

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Vibrodiagnostické merania a ich aplikácie na vybraných čerpadlách

Vibrodiagnostic Measurements and their Ap- plication on Selected Pumps

Študent:

Roman Chovanec

Vedúci práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Roman Chovanec**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Vibrodiagnostické měření a jejich aplikace na vybraných čerpadlech**
Vibrodiagnostic Measurements and their Application on Selected Pumps
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce se zabývejte problematikou technické diagnostiky čerpadel se zaměřením na vibrodiagnostiku. Rozeberte tuto problematiku, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření a vyhodnocení naměřených dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej*,

teoria i praktika. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Miestoprísasžné vyhlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave dňa 20. mája 2019

.....

Podpis študenta

Prehlasujem, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostrave dňa 20. mája 2019

.....
Podpis autora práce

Meno a priezvisko autora práce: Roman Chovanec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Nová Bystrica 888

ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE

CHOVANEK, R. Vibrodiagnostické merania a ich aplikácie na vybraných čerpadlách: bakalárska práca. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojná, Katedra výrobných strojů a konstruování, 2019, 77 s. Vedúci práce: Ing. Blata, J., Ph.D.

Témou bakalárskej práce je využitie metód technickej diagnostiky za účelom vyhodnotenia technického stavu čerpadiel. V úvodnej časti sú objasnené metódy vibračnej diagnostiky. V ďalšej časti práca obsahuje teoretický rozbor meraní vibrácií a konkrétne príčiny vzniku vibrácií. Práca taktiež obsahuje základne rozdelenie typov čerpadiel.

V ďalšej časti sa práca zaoberá už praktickým využitím diagnostiky. Zahrňuje priebeh merania, popis meradla, získané hodnoty a samotné vyhodnotenie technického stavu riešených zariadení.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

CHOVANEK, R. Vibrodiagnostic Measurements and their Application on Selected Pumps: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2019, 77 p. Supervisor: Ing. Blata, J., Ph.D.

The theme of the Bachelor thesis is the use of the methods of technical Diagnostics in order to evaluate the technical condition of the pumps. In the introductory section is clarified by the method of vibration diagnosis. In the next part of this work contains a theoretical analysis of the measurements of vibration and the specific cause of the vib-corporations. The work also contains the base distribution of types of pumps.

The next section deals with the practical work already using the Diagnostics. The course includes the measurement, description of the instrument, the values obtained and the evaluation of the technical condition of the equipment therein.

OBSAH

Zoznam skratiek	9
Zoznam tabuliek	11
Zoznam obrázkov	12
Úvod	14
1 Vibrodiagnostika	15
1.1 Základné metódy vibrodiagnostiky	15
1.1.1 Frekvenčná analýza pomocou FFT	15
1.1.2 Kepstrálna analýza	15
1.1.3 Celková mohutnosť kmitania (trendovanie vibrácií)	16
1.1.4 Obálková metóda (ENVELOP).....	16
2 Meranie vybrácií.....	17
2.1 Meracia veličina a postup	17
2.2 Meracie prístroje a frekvenčný rozsah.....	17
2.2.1 Všeobecne	17
2.2.2 Preventívne opatrenia.....	17
2.2.3 Trvalé a periodické monitorovanie	18
3 Základy diagnostických závad	19
3.1 Nesúosť	19
3.1.1 Uhlová nesúosť	19
3.1.2 Paralelná nesúosť	19
3.2 Mechanické uvoľnenie.....	20
3.2.1 Typ A	20
3.2.2 Typ B.....	20
3.2.3 Typ C.....	21
3.3 Nevyváženosť	21
3.3.1 Statická nevyváženosť.....	21
3.3.2 Momentová nevyváženosť	22
3.3.3 Dynamická nevyváženosť	22
4 Hydrodynamické čerpadlá	23
4.1 Odstredivé čerpadlá	23
4.2 Axiálne čerpadlá	23

5	Vady Indukčných motorov	25
5.1	Excentricita statora, skratované plechy alebo „voľné železo“	25
5.2	Excentricita rotora (Premenlivá vzduchová medzera).....	25
5.3	Problémy rotora	26
6	Meranie.....	27
6.1	Merané zariadenia.....	27
6.1.1	Motor M2BA MLA 2	27
6.1.2	Čerpadlo CTD 4.1 -65-10-000	28
6.2	Meracie zariadenie	30
6.3	Umiestnenie snímačov	31
6.4	Odber vzoriek oleja.....	34
6.5	Postup merania.....	35
7	Vyhodnotenie nameraných hodnôt	36
7.1	Doporučené hodnoty	36
7.2	Namerané hodnoty	38
7.2.1	Merané zariadenie A	38
7.2.2	Merané zariadenie B	43
7.2.3	Merané zariadenie C	52
8	Záver	57
9	Zoznam použitej literatúry	59

ZOZNAM SKRATIEK

Skratka	Význam	Jednotka
FFT	Fast Fourier transform (Rýchla Fourierová transformácia)	
Tzv.	Takzvaný	
Napr.	Napríklad	
ISO	International Organization for Standardization (mezdnárodná organizácia pre normalizáciu)	
RMS	Efektívna hodnota	
a _{RMS}	Efektívna hodnota zrýchlenia	g
v _{RMS}	Efektívna hodnota rýchlosti	mm/s
x	Násobok	
Obr.	Obrázok	
O-O	Os hriadeľa	
T-T	Hlavná os zotrvačnosti	
U	Ťažisko	
S	Stred	
F _U	Zotrvačná sila	F
BFP	Frekvencia prechodu lopatiek	
RBPF	Frekvencia prechodu rotorových tyčí	
IE	International Efficiency (triedy účinnosti)	
LPA	Vnútna hladina hluku	dB
L	Ložisko	
H	Horizontálny smer	
A	Axiálny smer	
V	Vertikálny smer	
FTF	Fundamental Train Frequency (frekvencia defektu kletky ložiska)	
BPFO	Ball Pass Frequency of Outer ring (frekvencia defektu vonkajšieho krúžku)	
BSF	Ball Spin Frequency (frekvencia defektu valivého telieska)	
BPFI	Ball Pass Frequency of Inner ring (frekvencia defektu vnútorného krúžku)	
F	Frekvencia	Hz
ED-XRF	Energeticky Disperzná X-Ray Fluorescencia	
ČSN	Česká technická norma	
ppm	Parts per million (častice na jeden milión)	mg/kg
Fe	Železo	
Cu	Meď	
Cr	Chróm	
Sn	Cín	
S	Síra	

P	Fosfor	
Na	Sodík	
Zn	Zinok	
Ca	Vápnik	
Si	Kremík	

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Údaje motora.[4]	28
Tabuľka 2 Údaje motora.[4]	28
Tabuľka 3 Údaje ložiska v motore [6]	28
Tabuľka 4 Údaje ložiska v čerpadle [7]	30
Tabuľka 5 Doporučené hodnoty rýchlosti vibrácií v pásme 10-1000 Hz podľa ČSN ISO 10816-7	36
Tabuľka 6 Doporučené hodnoty zrýchlenia vibrácií v pásme 500-25000 Hz	36
Tabuľka 7 Vlastnosti použitého oleja dané výrobcom	37
Tabuľka 8 Prvková analýza referenčného oleja	37
Tabuľka 9 Namerané hodnoty čerpadla A	38
Tabuľka 10 Rozbor oleja čerpadla L3	39
Tabuľka 11 Rozbor oleja čerpadla L4	39
Tabuľka 12 Namerané hodnoty čerpadla B	43
Tabuľka 13 Rozbor oleja čerpadla L3	44
Tabuľka 14 Rozbor oleja čerpadla L4	44
Tabuľka 15 Namerané hodnoty čerpadla C	52
Tabuľka 16 Rozbor oleja čerpadla L3	52
Tabuľka 17 Rozbor oleja čerpadla L4	53

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Časový priebeh vibrácií v priebehu technického života – VAŇOVÁ KRIVKA	16
Obr. 2 Metódy pripevnenia snímačov vibrácií [2].....	18
Obr. 3 Uhlová nesúososť [3].....	19
Obr. 4 Paralelná nesúososť [3].....	19
Obr. 5 Typ A [3]	20
Obr. 6 Typ B [3]	20
Obr. 7 Typ C [3]	21
Obr. 8 Statická nevyváženosť [1]	21
Obr. 9 Momentová nevyváženosť [1].....	22
Obr. 10 Dynamická nevyváženosť [1].....	22
Obr. 11 Axiálne (vrtuľové) čerpadlo [12].....	24
Obr. 12 Excentricita statoru, skratované plechy alebo „voľné plechy“ (Nákres) [3]	25
Obr. 13 Excentrický rotor (Nákres) [3]	26
Obr. 14 Problémy rotora (Nákres) [3]	26
Obr. 15 Motor M2BA 315 MLA 2 [4].....	27
Obr. 16 Čerpadlo CTD 4.1-65-10-000 [5].....	29
Obr. 17 Popis typu čerpadla.....	29
Obr. 18 A4400 VA4 Pro [8]	30
Obr. 19 Umiestnenie snímačov.....	31
Obr. 20 Umiestnenie snímačov.....	32
Obr. 21 Umiestnenie snímačov.....	33
Obr. 22 Umiestnenie snímačov.....	33
Obr. 23 Odberné miesto ložísk L3 a L4.....	34
Obr. 24 Odberná striekačka	35
Obr. 25 Výsledné filtre ložísk L3 a L4	40
Obr. 26 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií ložiska L2 (vertikálna sonda)	40
Obr. 27 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L2 (axiálna sonda)	41
Obr. 28 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2(vertikálna sonda)	41
.....	41
Obr. 29 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií L2 (axiálna sonda).....	42
Obr. 30 Obálka zrýchlenia L2 (vertikálna sonda).....	42
Obr. 31 Obálka zrýchlenia L2 (vertikálna sonda).....	43

Obr. 32 Výsledné filtre ložísk L3 a L4	45
Obr. 33 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L1 motora (vertikálna sonda).....	45
Obr. 34 Porovnanie frekvenčných spektier efektívneho zrýchlenia(vertikálna sonda) ložiska L1 pred a po premazaní (vzadu pred premazaním).....	46
Obr. 35 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (vertikálna sonda).....	46
Obr. 36 Porovnanie frekvenčných spektier efektívneho zrýchlenia(vertikálna sonda) ložiska L2 pred a po premazaní (vzadu pred premazaním).....	47
Obr. 37 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 (axiálna sonda)	47
Obr. 38 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 (axiálna sonda) po premazaní plastickým mazivom	48
Obr. 39 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda)	48
Obr. 40 Porovnanie obálok zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda) pred a po premazaní (vzadu po premazaní).....	49
Obr. 41 Obálka zrýchlenia s poruchovou frekvenciou ložiska L2	49
Obr. 42 Obálka zrýchlenia s harmonickým kurzorom cez BPFO	50
Obr. 43 Rozbeh efektívnej rýchlosti L2 (vertikálna sonda).....	51
Obr. 44 Rozbeh efektívneho zrýchlenia L2 (vertikálna sonda).....	51
Obr. 45 Výsledné filtre ložísk L3 a L4	53
Obr. 46 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L1 (axiálna sonda)	54
Obr. 47 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L2 (axiálna sonda)	54
Obr. 48 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií L1 (axiálna sonda)	55
Obr. 49 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií L2 (axiálna sonda)	55
Obr. 50 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L1 motora (axiálna sonda)	56
Obr. 51 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda)	56

ÚVOD

V bakalárskej práci budem riešiť otázku technického stavu troch rovnakých zariadení, z ktoré každá zahrňuje motor M2BA 315 MLA 2 s čerpadlom CTD 4.1-65-10-000. Zmienené čerpadlá sa používajú na dodávanie vody do parnej turbíny vo firme PRECHEZA a.s..

Na vyhodnotenie technického stavu som sa rozhodol využiť metódy vibrodiagnostiky. Meranie sa uskutoční v dvoch termínoch s minimálne mesačnou medzerou a v súlade s normou o hodnotení vibrácií strojov na základe meraní na nerotujúcich častiach ISO 10 816-7. Ako meradlo využijem vibračný analyzátor ADASH VA4 PRO. Vibrácie sa budú merať na oboch ložiskách pre všetky čerpadlá a motory. Pre zvýšenie pravdivosti výsledkov získaných vibrodiagnostikou rozšírim analýzu o parametrické meranie, konkrétne sa bude jednať o tribodiagnostické testy olejov odobraných od ložísk čerpadiel.

Výsledkom bakalárskej práce je vyhodnotenie technického stavu daných zariadení za pomoci využitia metód vibrodiagnostiky a tribodiagnostiky.

1 VIBRODIAGNOSTIKA

Vibrodiagnostika patrí k najdôležitejším metódam technickej diagnostiky. Hlavnou úlohou danej metódy je zaznamenávanie a vyhodnocovanie vibrácií za účelom určenia aktuálneho technického stavu rotačného zariadenia. Získané informácie o vibráciách, ktoré úzko súvisia s dynamickým namáhaním rotačného zariadenia, sa využívajú na vyhodnotenie stavu ložísk, opotrebenia, nevývahou, a pod. Údaje o stave sa ďalej využívajú na návrh strategického plánu údržby.

1.1 Základné metódy vibrodiagnostiky

1.1.1 Frekvenčná analýza pomocou FFT

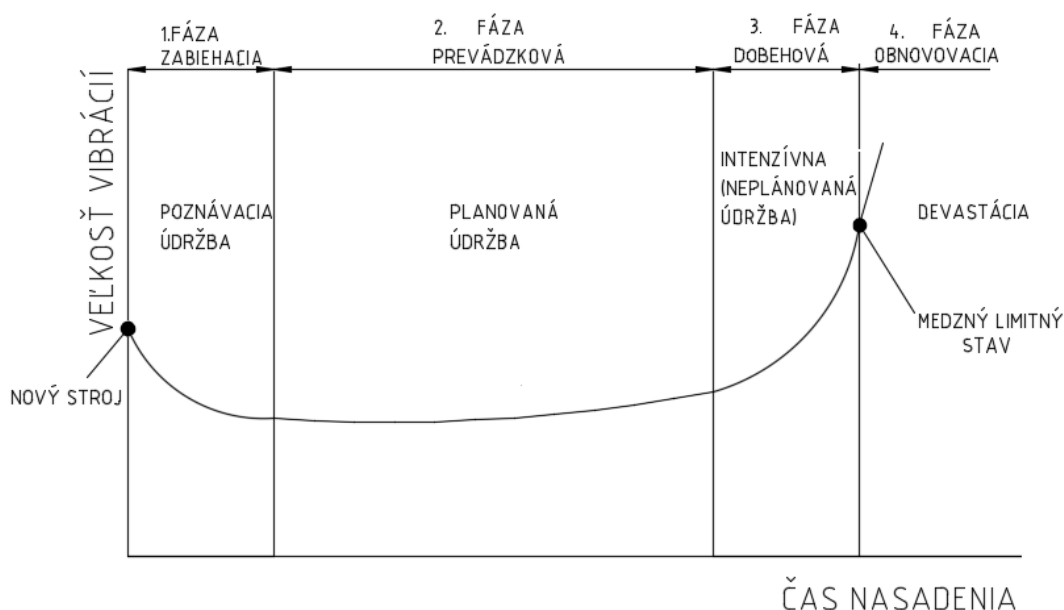
Frekvenčná analýza vibračných signálov pomocou FFT (Fast Fourier transform) je jednou z najpoužívanějších metód v súčasnosti. Táto metóda vyhľadáva periodické procesy v priebehu vibračného signálu, ktoré sa zobrazujú v jednom z dvoch možných súradnicových systémoch. V prípade použitia súradníc amplitúda (os y) a frekvencia (os x) hovoríme o frekvenčnom spektre a pri kombinácii amplitúda (osy) a čas (os x) sa jedná o časovom priebehu. Na určenie práve spomenutého frekvenčného spektra sa najčastejšie využíva FFT a to pre svoju rýchlosť, presnosť, zrozumiteľnosť nastavenia parametrov a možnosti uskuutočnenia vo forme univerzálneho elektronického obvodu. Frekvenčným rozkladom získame množstvo sínusových signálov s náležitou amplitúdou a počiatočnou fázou. Tieto informácie sa využívajú na určenie technického stavu a príčin zhoršenia.[1]

1.1.2 Kepstrálna analýza

Kepstrálna analýza hľadá periodické procesy vo frekvenčnom spektre, takže hľadá opakujúce sa rozdiely medzi frekvenčnými čiarami, na ktoré sú namodulované bočné pásma. Jedná sa teda o frekvenčnú analýzu frekvenčného spektra a zobrazuje údaje v oblasti v oblasti modulácie postranného pásma. Táto metóda je využívaná ako pomôcka pre orientáciu v nameranom spektre, na zisťovanie napr. poškodenia valivých ložísk, bokov zubov, prevodoviek alebo na zistenie amplitúdovej a frekvenčnej modulácie.[1]

1.1.3 Celková mohutnosť kmitania (trendovanie vibrácií)

Jedná sa o vykonávanie meraní v pravidelných intervaloch a ich dlhodobý záznam pre možnosť porovnania s aktuálnou hodnotou. Hlavným aspektom uvedenej metódy je trendový graf. Trendový graf je časový graf zobrazujúci súčasne a predchádzajúce hodnoty vibrácií v závislosti na čase. Na základe získaných hodnôt v trendovom grafe získavame tzv. vaňovú krivku. Uvedená krivka zobrazuje časový priebeh veľkostí vibrácií počas technického života pre danú časť zariadenia. Následne môžeme vďaka vytvorenej krivke predpovedať zostatkovú životnosť a ďalšie informácie užitočné pre strategické plánovanie údržby.[1]



Obr. 1 Časový priebeh vibrácií v priebehu technického života – VAŇOVÁ KRIVKA

(Nákres) [1]

1.1.4 Obáľková metóda (ENVELOP)

Obáľková metóda sa používa z dôvodu, že činnosť ložísk, s opakujúcim sa charakterom, vykazujú vibračný signál s veľmi nízkou amplitúdou a vyššími frekvenciami s porovnaním s vibráciami vytvárané napr. nevyváhou. Princíp metódy spočíva v meraní rázových impulzoch, ktoré vznikajú pri narušení dráhy, po ktorej prechádza valivé teliesko. Pri obáľkovej analýze sa vstupný signál upravuje pomocou vysokofrekvenčného filtra a obáľkového detektora. Vďaka tejto úprave je signál pripravený pre použitie FFT analýzy pomocou, ktorej vyhodnotíme technický stav ložiska. [1]

2 MERANIE VYBRÁCIÍ

2.1 Meracia veličina a postup

Meracia veličina používaná pre určenie vibrácií na nerotujúcich častiach odstredivých čerpadiel je efektívna hodnota rýchlosti vibrácií v mm/s. V prípade otáčok pod 600 1/min je požadované meranie výchylky špička-špička v μm . Postup merania je popísaný v ISO 10816-1. [2]

2.2 Meracie prístroje a frekvenčný rozsah

2.2.1 Všeobecne

Meracie prístroje musia spĺňať požiadavky stanovené v ISO 10816-1. Od meradiel sa požaduje schopnosť určenia efektívnej hodnoty rýchlosti vibrácií v širokom frekvenčnom rozsahu od 10 Hz do 1000 Hz a musia spĺňať požiadavky dané ISO 2954.

Vzhľadom na to, že širokopásmová výchylka špička-špička v nízkofrekvenčnom rozsahu môže byť značne ovplyvnená náhodným impulzným budením v dôsledku prúdenia kvapaliny sa môžu niekedy vyskytovať hodnoty vyššie ako obvyklé a následne majú byť analyzované a popísané napr. frekvenčným filtrovaním. Z toho dôvodu sa pre vyhodnotenie kvality čerpadla doporučuje merať výchylku špička-špička ako filtrované hodnoty pri 0,5násobku, 1násobku, 2násobku frekvencie otáčania so šírkou pásma 1Hz alebo užšou.

Pre diagnostické účely alebo pre čerpadlá s vysokými otáčkami sa môže požadovať využitie meracieho zariadenia, ktorý pokrýva väčší frekvenčný rozsah, zvyčajne až do 2,5násobku frekvencie prechodu lopatiek. [2]

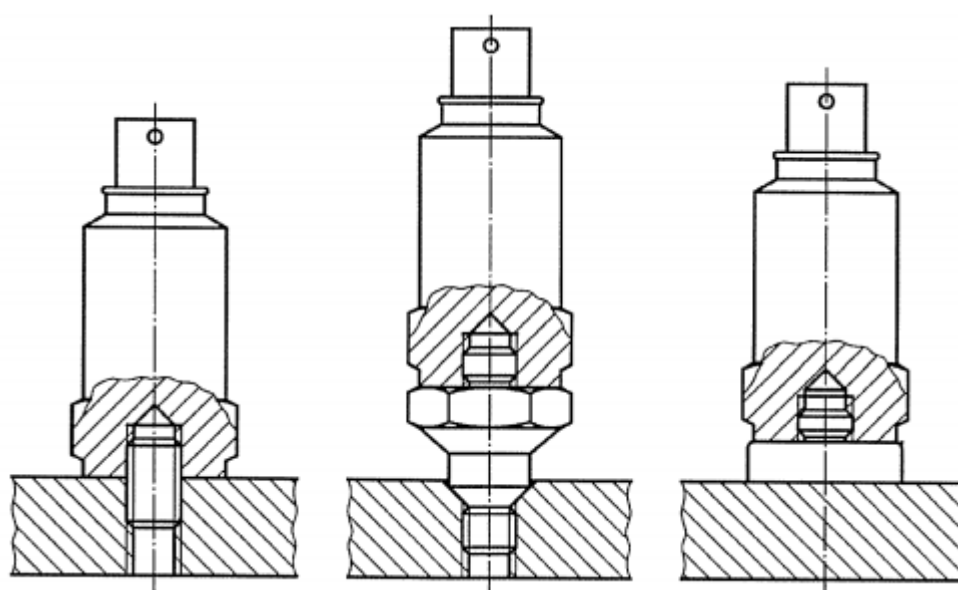
2.2.2 Preventívne opatrenia

Požaduje sa minimálne ovplyvnenie meracieho zariadenia činiteľmi, ktoré môžu byť:

- kolísanie teploty;
- magnetické pole;

- zvukové pole;
- kolísanie napájacieho napätia;
- dĺžka káblov k snímačom;
- orientácia snímačov.

Veľký dôraz kladieme na vhodné pripevnenie snímačov. Neprávne pripevnenie môže výrazne ovplyvniť správnosť prevedeného merania. V prípade použitia snímačov s magnetickým úchytom sa má plocha, na ktorú sa bude snímač pripevňovať vhodne upraviť, aby nedošlo k chybám merania. [2]



Obr. 2 Metódy pripevnenia snímačov vibrácií [2]

2.2.3 Trvalé a periodické monitorovanie

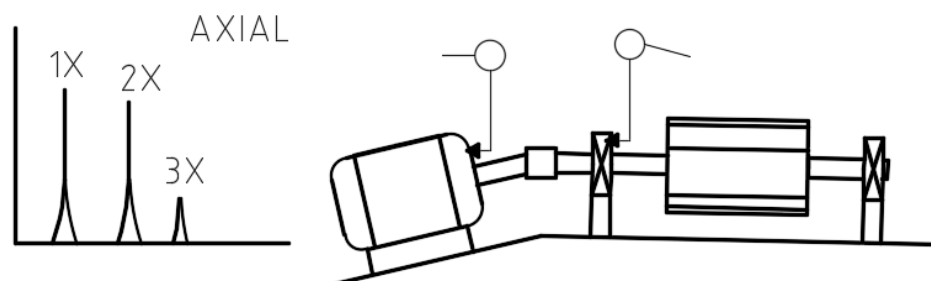
V prípade rozmernejších alebo dôležitejších čerpadiel sa často používajú trvalo nainštalované prístroje využívané pre online monitorovanie vibrácií v kritických meracích miestach. Kontinuálne monitorovanie nie je využívané vždy, v prípade malých čerpadiel alebo čerpadiel s nízkym výkonom sa využíva periodické monitorovanie pomocou prenosných meradiel, ktoré spoľahlivo objavuje vznikajúce defekty čerpadla. [2]

3 ZÁKLADY DIAGNOSTIKÝCH ZÁVAD

3.1 Nesúososť

3.1.1 Uhlová nesúososť

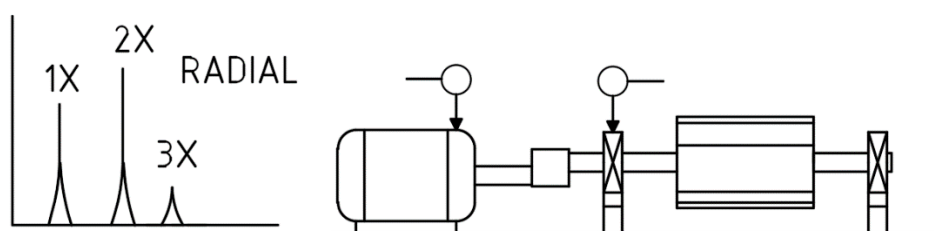
Pri uhlovej nesúososti dochádza k veľkým axiálnymi vibráciám, ktoré sa menia o 180° cez spojku. V klasickom prípade sú veľké axiálne vibrácie na oboch zložkách 1X a 2X RPM, ale nie je vylúčené, že dominuje jedna zo zložiek 1X, 2X prípadne 3X RPM. Uvedené príznaky môžu taktiež indikovať existenciu problémov so spojkou. [3]



Obr. 3 Uhlová nesúososť [3]

3.1.2 Paralelná nesúososť

Vzniká v dôsledku paralelného posunutia a má podobné príznaky ako uhlová nesúososť. Charakteristické sú veľké radiálne vibrácie, ktoré sú cez spojku v protifáze. Zložka 2X je obvykle väčšia ako 1X a jej veľkosť voči 1X je často závislá od typu a konštrukcie spojky. V prípade veľkého presadenia sa vytvárajú amplitúdy s 4x až 8x vyššou harmonickou zložkou otáčkovej frekvencie. [3]



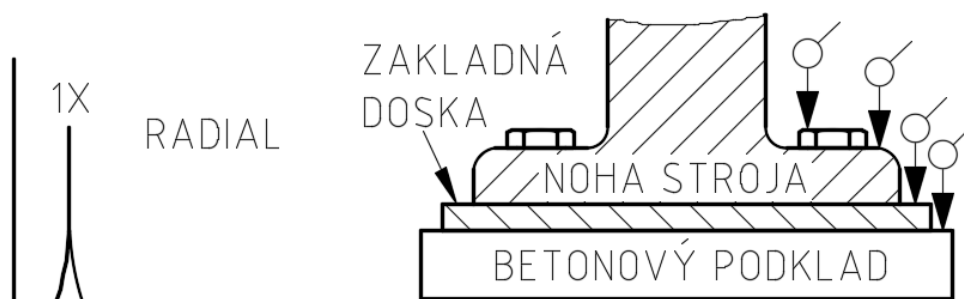
Obr. 4 Paralelná nesúososť [3]

3.2 Mechanické uvoľnenie

Mechanické uvoľnenie je udávané spektrami typu A, B a C.

3.2.1 Typ A

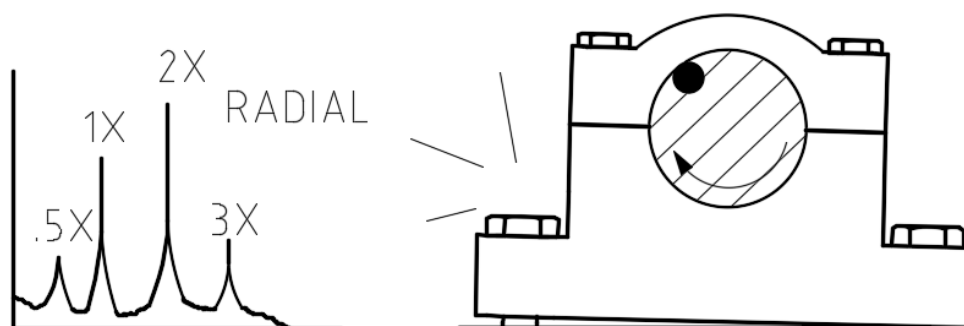
Nastáva ako dôsledok štruktúrneho uvoľnenia pätiiek stroja, základového rámu alebo základu. Ďalšie môžu byť uvoľnenie základových skrutiek v základoch alebo deformáciou základového rámu alebo samotného základu. Prejavuje sa vibráciami s fázovým rozdielom 90° až 180° medzi vertikálnym meraním na skrutke, pätke stroja, základovej doske alebo základu.[3]



Obr. 5 Typ A [3]

3.2.2 Typ B

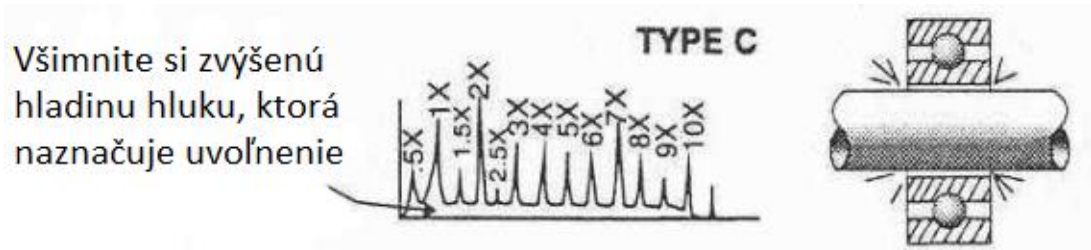
Spôsobuje ho uvoľnenie skrutiek ložiskového stoja, trhliny v konštrukcii v ráme alebo ložiskovom stojane.



Obr. 6 Typ B [3]

3.2.3 Typ C

Spektrum typu C je vytvárané nesprávnym lícovaním medzi jednotlivými súčiastkami. Tento nedostatok môže spôsobovať nelineárnu odozvu všetkých voľných častí na dynamické sily rotora. Výsledkom je zvýšený prah šumu a orezaná časová vlna v spektre. Spektrum typu C je často neustálené a teda sa môže výrazne meniť medzi jednotlivými meraniami. Uvoľnenie je silne smerové a môže spôsobovať výrazne zmeny radiálnych hodnôt po obvode. Taktiež môže spôsobovať subharmonické násobky presne v $1/2$ alebo $1/3$ RPM. [3]

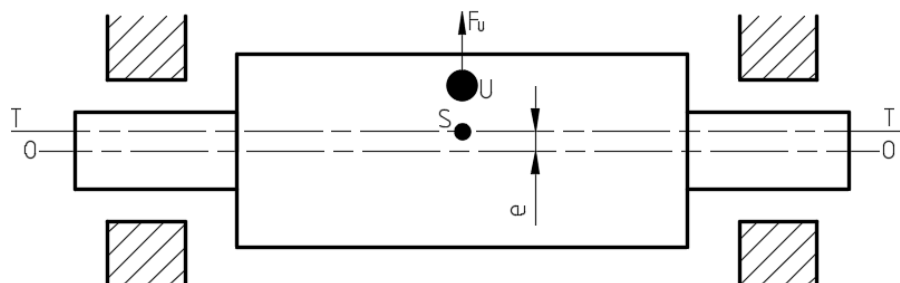


Obr. 7 Typ C [3]

3.3 Nevyváženosť

3.3.1 Statická nevyváženosť

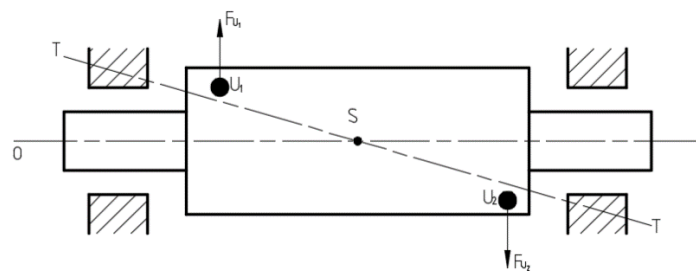
Je spôsobená chybou v ťažisku, ktorá vytvára tzv. ťažký bod. To spôsobuje paralelné posunutie osy zotrvačnosti voči ose otáčania, pričom ich vzdialenosť sa zhoduje s posunutím ťažiska. V tomto prípade pôsobí len jedna sila. Vyvažovanie sa vykonáva len v jednej vyvažovacej rovine. [1] [3]



Obr. 8 Statická nevyváženosť [1]

3.3.2 Momentová nevyváženosť

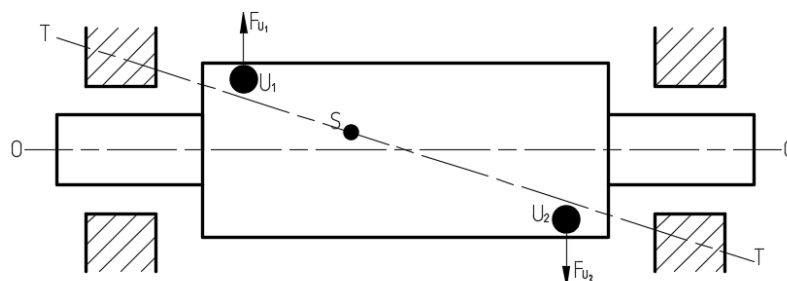
Spôsobuje ju uhol, ktorý vzniká medzi hlavnou osou zotrvačnosti a osou otáčania prechádzajúce ťažiskom rotora. V prípade momentovej nevyváženosti pôsobia dve rovnaké sily proti sebe (o 180°). Tieto sily pri otáčaní rotora posúvajú konce hriadel'ov opačným smerom. Vždy je prítomná zložka $1 \times \text{RPM}$ a je výrazne najväčšia. Amplitúda sa mení so štvorcom otáčkovej frekvencie pod prvú kritickú otáčkovú frekvenciu. Spôsobuje vysoké vibrácie v axiálnom a radiálnom smere. Vyvažovanie sa vykonáva najmenej v dvoch rovinách. [1] [3]



Obr. 9 Momentová nevyváženosť [1]

3.3.3 Dynamická nevyváženosť

Je najčastejším typom a je spôsobená spojením statickej a dynamickej nevyváženosti. V tomto prípade hlavná osa zotrvačnosti neprechádza cez osu otáčania v ťažisku. V spektre znova dominuje $1 \times \text{RPM}$. Vytvára sa fázový posun medzi horizontálnymi vibráciami na vonkajšom a vnútornom ložisku od 0° až 180° . Ale rozdiel fáz v horizontálnom smere má odpovedať s rozdielom fáz vo vertikálnom smere pri porovnaní na vonkajšom a vnútornom ložisku. [1] [3]



Obr. 10 Dynamická nevyváženosť [1]

4 HYDRODYNAMICKÉ ČERPADLÁ

V prípade hydrodynamických čerpadiel dochádza k premene mechanickej energie na tlakovú energiu a to nepriamo cez zmenu kinetickej energie kvapaliny.

4.1 Odstredivé čerpadlá

Odstredivé čerpadlá využívajú pre svoju funkciu odstredivú energiu kvapaliny. Mechanická energia je vytváraná hnacím motorom – energia obežného kolesa, kde sa premieňa na kinetickú a tá sa následne premieňa v špirále alebo rozvážacom kolese na tlakovú energiu. Následkom tejto dvojitej premeny je zníženie celkovej účinnosti hydrodynamických čerpadiel s porovnaním hydrostatickými čerpadlami. Kvapalina u preberaných čerpadlách preteká kontinuálne. Čerpadlá tohto typu majú menšie rozmery, hmotnosť a jednoduchšiu konštrukciu.

Rozdeľujú sa na :

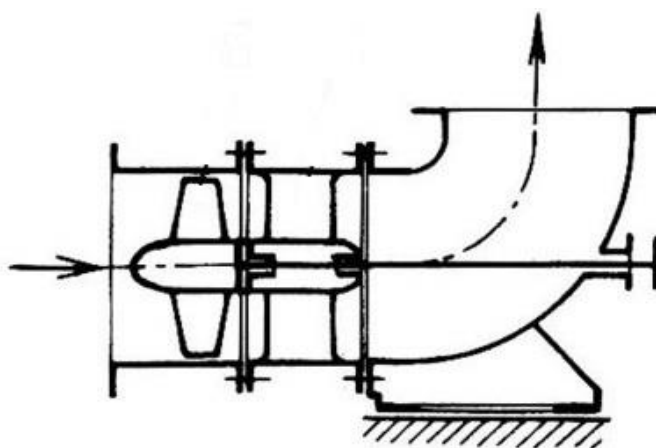
- Radiálne – kvapalina vstupuje do obehového kolesa v smere osi hriadeľa a vystupuje kolmo k ose otáčania
- Diagonálne - do diagonálneho odstredivého čerpadla vstupuje kvapalina v axiálnom smere osi otáčania špirály a vystupuje diagonálne. [9] [10] [11] [13]

4.2 Axiálne čerpadlá

V prípade axiálnych čerpadiel sa kvapalina privádza v smere osi hriadeľa a tom istom smere aj odchádza. Obežné koleso je pevne pripevnené na hriadeľ. Koleso má aspoň dve lopatky, ktoré môžu byť nastaviteľné alebo pevné. Čerpadlá tohto typu môžu dosahovať vyššej účinnosti ako odstredivé.

Podľa konštrukcie obežných kolies sa rozdeľujú na:

- Skrutkové axiálne koleso – vzniká prípade ak sú lopatky obežného kolesa široké dostatočne nato, aby sa aspoň čiastočne prekrývali
- Koleso tvaru vrtule – lopatky sú úzke a neprekrývajú sa následkom čoho je, že sa nevytvárajú medzi nimi kanále a teda sa musí každá lopatka v prúde pracuje samostatne. [9] [10] [12] [13]

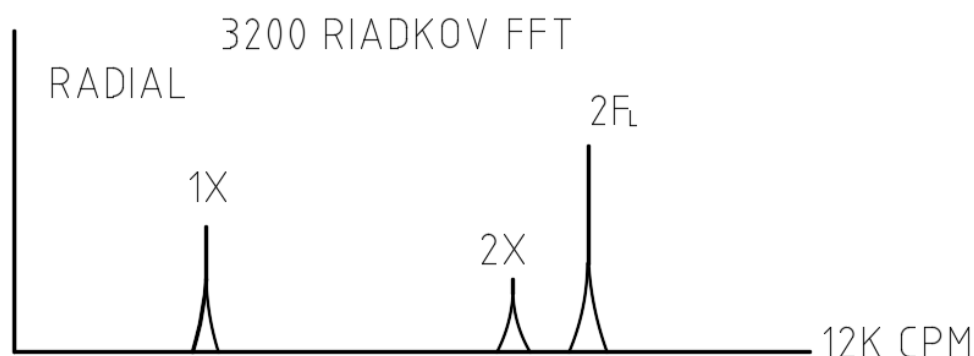


Obr. 11 Axiálne (vrtuľové) čerpadlo [12]

5 VADY INDUKČNÝCH MOTOROV

5.1 Excentricita statora, skratované plechy alebo „voľné železo“

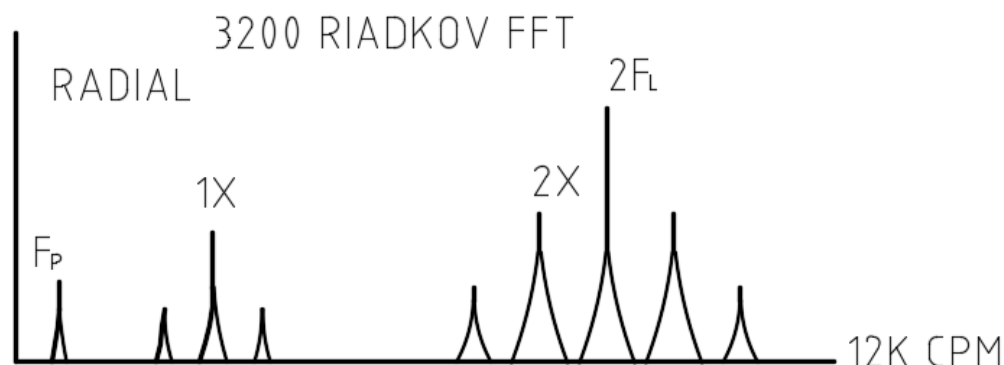
Defekty na statore môžu spôsobovať vysoké vibrácie na druhej sieťovej frekvencii ($2F_L$). Excentricita produkuje nerovnomernú stacionárnu vzduchovú medzeru medzi rotorom a statorom, výsledkom čoho sú výrazné smerové vibrácie. Uvoľnenie alebo nízka tuhosť nosnej časti statora môže spôsobiť jav s názvom „Voľné železo“ následkom čoho môže byť nerovnomerný lokálny ohrev, ktorý môže deformovať samotný stator. Týmto sa vytvárajú teplotné indukované vibrácie, ktoré narastajú so zvyšujúcimi sa otáčkami a s dobou prevádzky. Vibrácie deformujú stator a problémy so statickou vzduchovou medzerou, ktorej rozdiel nesmie prekročiť 5% u indukčných motoroch a 10% u synchronných motoroch. [3]



Obr. 12 Excentricita statoru, skratované plechy alebo „voľné plechy“ (Nákres) [3]

5.2 Excentricita rotora (Premenlivá vzduchová medzera)

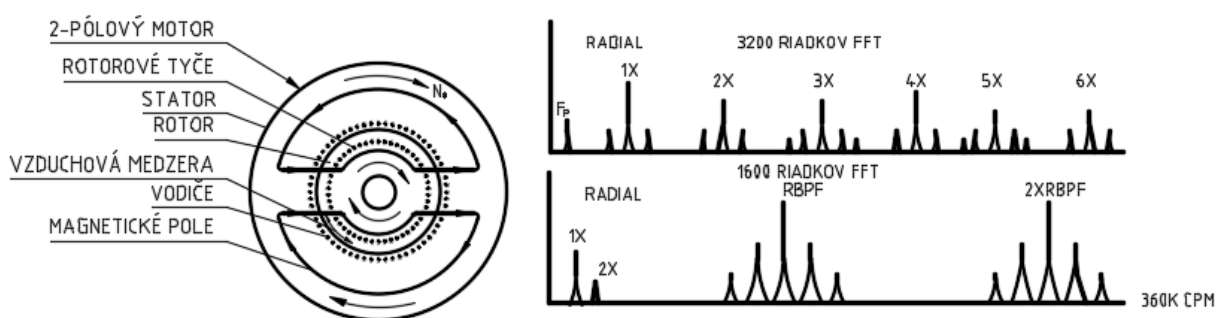
Excentricita rotora spôsobuje premenlivú vzduchovú medzeru medzi rotorom a statorom následkom čoho sú pulzujúce vibrácie (väčšinou medzi $2F_L$ a najbližším harmonickým násobkom otáčkovej frekvencie). Vznikajúce frekvencie $2F_L$ sú obklopené postrannými pásmi s frekvenciou prechodu pólov (F_P) a taktiež postranné pásma F_P okolo otáčkovej frekvencie. Samotná F_P sa objavuje na nízkej frekvencii. Pre dostatočné rozlíšenie frekvencie $2F_L$ a harmonickej frekvencie je potrebné priblížené spektrum. [3]



Obr. 13 Excentrický rotor (Nákres) [3]

5.3 Problémy rotoru

Najbežnejšími vadami sú: poškodené rotorové tyče alebo koncové prstence, nevhodné spoje medzi rotorovými tyčami a koncovými prstencami alebo skratované rotorové plechy. Spomenuté vady spôsobujú vysoké vibrácie na otáčkovej frekvencii rotora s postrannými pásmi od prechodu póla F_p . Často sa vytvárajú aj postranné pásma F_p okolo $2X$, $3X$, $4X$ a $5X$. V prípade postranných pásiem $2X F_L$ okolo frekvencie prechodu rotorových tyčí (Rotor Bar Frequency- RBPF) a jej harmonických násobkov sa jedná o uvoľnenie alebo rozpojenie rotorových tyčí. To spôsobuje vysoké úrovne na $2X$ RBPF a iba s malou amplitúdou na $1X$ RBPF. [3]



Obr. 14 Problémy rotora (Nákres) [3]

6 MERANIE

6.1 Merané zariadenia

6.1.1 Motor M2BA MLA 2

Nízkonapäťový motor typu M2BA MLA 2 vyrábaný švajčiarskou firmou ABB pre vodu a odpadovú vodu bol pôvodne vytvorený pre anglický vodohospodársky priemysel. Motor obsahuje funkcie, ktoré poskytujú väčšiu ochranu pred environmentálnymi podmienkami nájdených v aplikáciách vody a odpadových vôd.



Obr. 15 Motor M2BA 315 MLA 2 [4]

Vinutia sú navrhnuté tak, aby spĺňali alebo prekračovali IE3 alebo IE4 efektivity, čo vedie k zníženým stratám vďaka čomu motor pracuje s nižšou teplotou, výsledkom čoho sú predĺžené intervaly opätovného mazania, dlhšia životnosť ložiska a predĺžená životnosť izolácie. Ložiská a vnútorné komponenty sú chránené V-krúžkom a labyrintovým tesnením. Motor taktiež obsahuje snímač teploty, ktorý poskytuje preventívnu ochranu.[4]

Tabuľka 1 Údaje motora.[4]

Názov	Kód produktu	Výkon kW	Rýchlosť r/min	Hmot- nosť Kg	Prúd	
					I _N A	I _S /I _N
M2BA 315 MLA 2	3GBA 311 410- ••M	200	2983	1033	342	7.7

Tabuľka 2 Údaje motora.[4]

Efektivita IEC 60034-30-1, 2014			Krútiaci moment			Moment zotrvačnosti	Hlučnosť	Frek- vencia
Plná záťaž	$\frac{3}{4}$ záťaž	$\frac{1}{2}$ záťaž	T _N			J = $\frac{1}{4}$	Stupeň LPA	Hz
100%	75%	100%	Nm	I _S /I _N	T _b /T _N	GD ² kgm ²	dB	
95,8	95,8	95,4	640	2,5	3,1	2,1	81	50

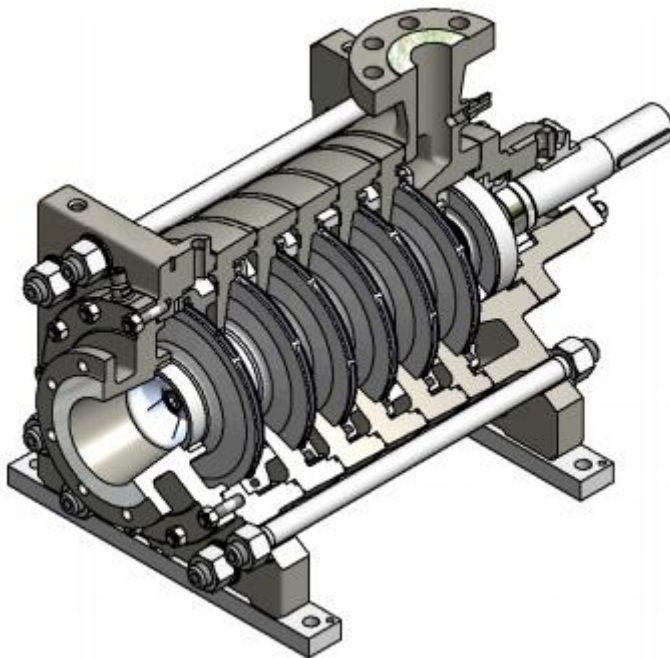
Tabuľka 3 Údaje ložiska v motore [6]

Typ ložiska	SKF 6212-2Z/C3 Guľôčkové ložisko
Vnútorňý priemer - d	60.00
Vonkajší priemer – D	110.00
Šírka - B	22.00
Radiálna vôľa	C3 - Väčšia ako normálna
Druh tesnenia	2Z - Obojstranné krytie oceľovým plechom
Materiál kletky	Oceľ
Prevedenie vonkajšieho krúžka	Valcový povrch
Prevedenie vnútorného krúžka	Valcový otvor
Trieda presnosti	Normálna

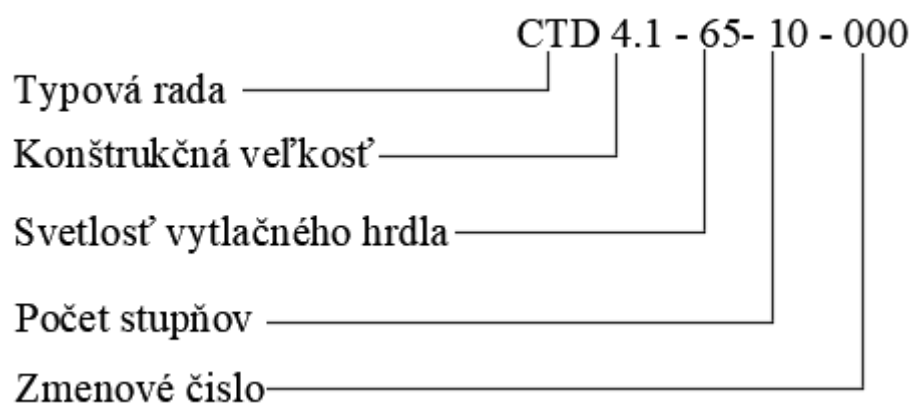
6.1.2 Čerpadlo CTD 4.1 -65-10-000

Čerpadlo typu CTD 4.1 -65-10-000 je horizontálne odstredivé čerpadlo s obežným kolesom radiálneho tvaru. Skupina čerpadiel CTD majú radiálny vstup. Tlakové časti čerpadla sú vyrobené z liatej ocele a utesnené O krúžkami. Vzhľadom na rozdielne povrchy

(predného a zadného) obežných kolies, dochádza k axiálnym silám, ktoré pôsobia na rotor smerom k nasávaniu čerpadla. Z toho dôvodu čerpadlo obsahuje vyrovnávajúci disk na absorbovanie týchto síl. [5]



Obr. 16 Čerpadlo CTD 4.1-65-10-000 [5]



Obr. 17 Popis typu čerpadla

Tabuľka 4 Údaje ložiska v čerpadle [7]

Typ ložiska	SKF NU 2211 ECJ Valčkové ložisko
Vonkajší priemer – D	100
Vnútorý priemer - d	55

6.2 Meracie zariadenie

Na meranie som použil A4400 VA4 Pro od firmy Adash s.r.o. Je to prístroj používaný v oblasti vibrodiagnostiky strojov. Obsahuje základné moduly analyzátoru, datakolektoru a rekordéru meraných signálov. Prístroj taktiež obsahuje ďalšie moduly pre vyvažovanie strojov, meraní rozbehov a dobehov, ultrazvuku, akustické merania, rázové testy, kontrolu mazania a modulom prevádzkových tvarov kmitov. Používa sa predovšetkým na servisnú a inšpekčnú činnosť. [8]

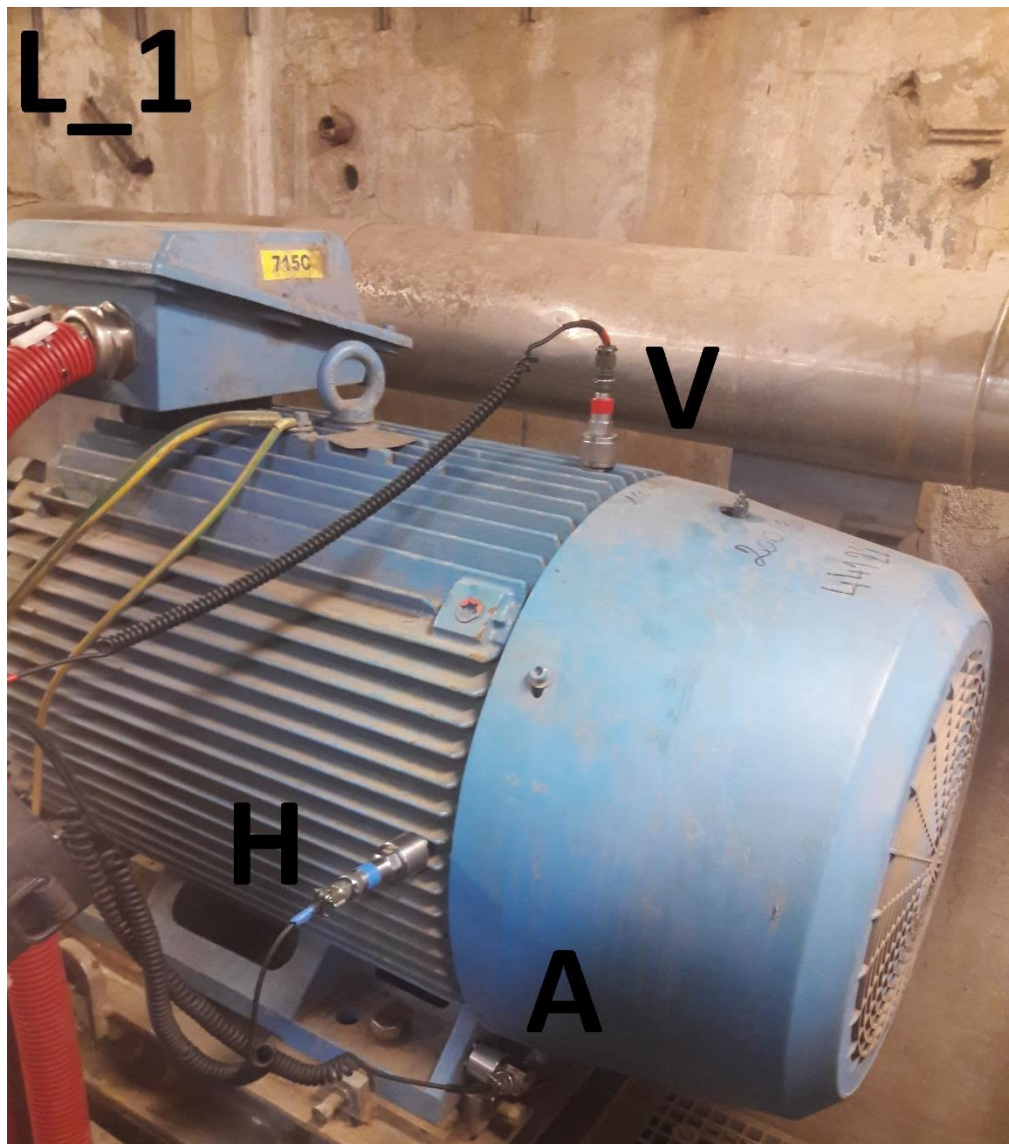


Obr. 18 A4400 VA4 Pro [8]

6.3 Umiestnenie snímačov

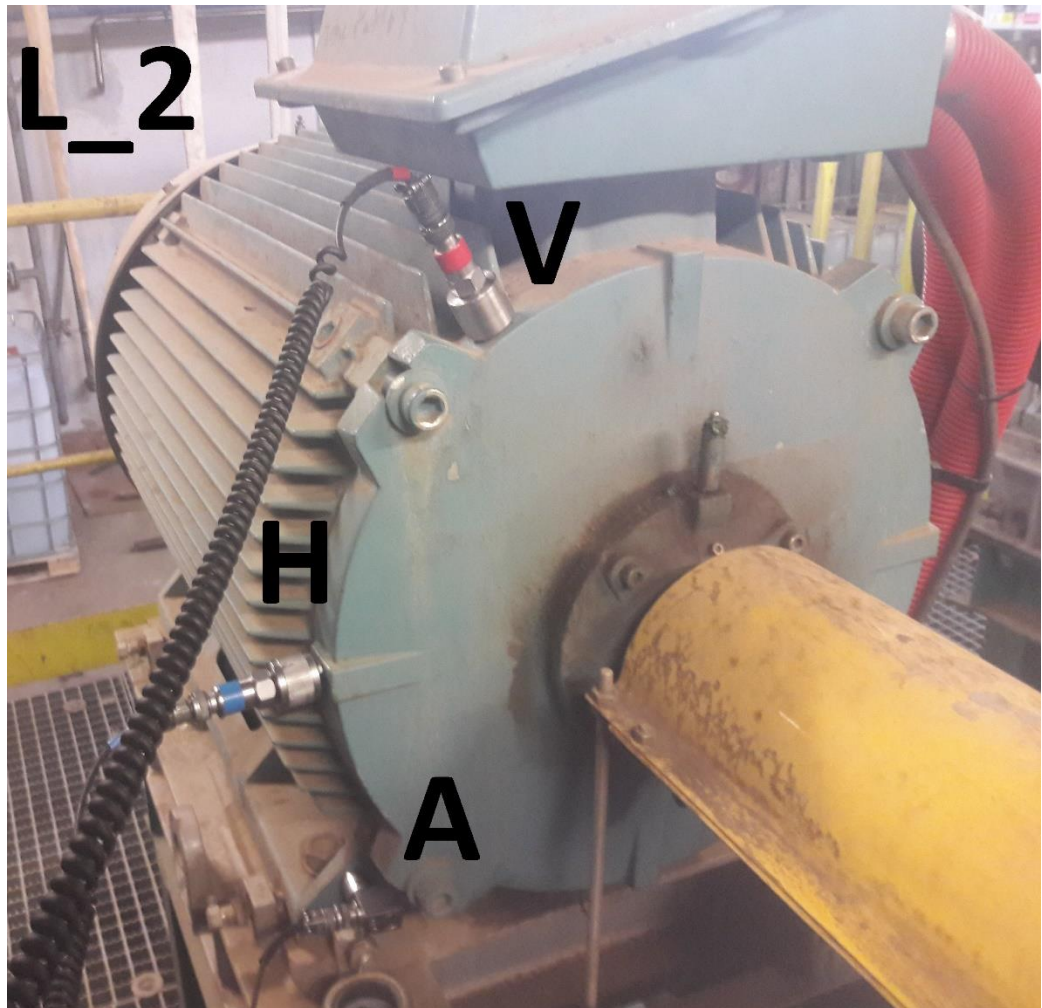
Meranie sa vykonalo na ložiskových telesách strojov. Samotné miesta sa vyberali tak, aby dynamické sily boli reprezentované s požadovanou citlivosťou. Magnety snímačov sa umiestňovali tak, aby boli v blízkosti osy ložísk.

V našom prípade sa meralo v troch smeroch a to v horizontálnom, vertikálnom a axiálnom. Merali sa vibrácie na troch rovnakých jednotkách, zahŕňajúce čerpadlo a motor, ktorých každá obsahovala štyri ložiská. Umiestnenia snímačov sú zobrazené na obrázkoch 25 až 28.



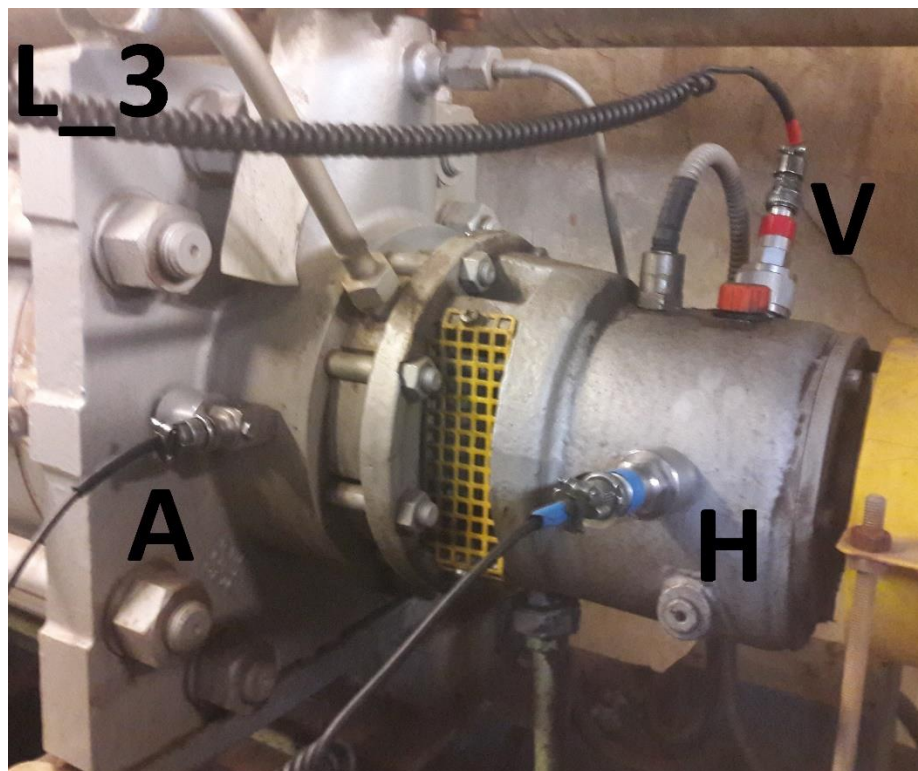
Obr. 19 Umiestnenie snímačov

Umiestnenie snímačov na polohe L1 bolo bezproblémové avšak axiálny snímač sa umiestnil na pätku motora pretože umiestnenie na kryt ventilátora je nevyhovujúce.

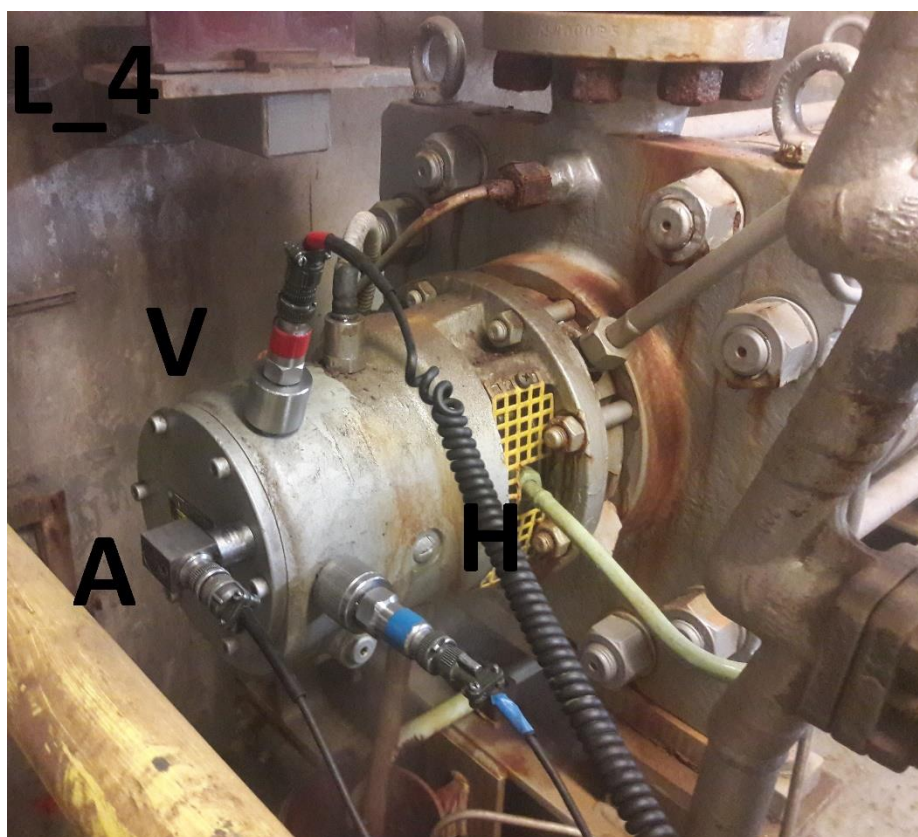


Obr. 20 Umiestnenie snímačov

Z dôvodu neprístupnosti sa musel horizontálny snímač umiestniť tak ako je uvedené na obr. č. 26. Axiálny snímač sa umiestnil na pätku motora z dôvodu oblého tvaru čela motora.



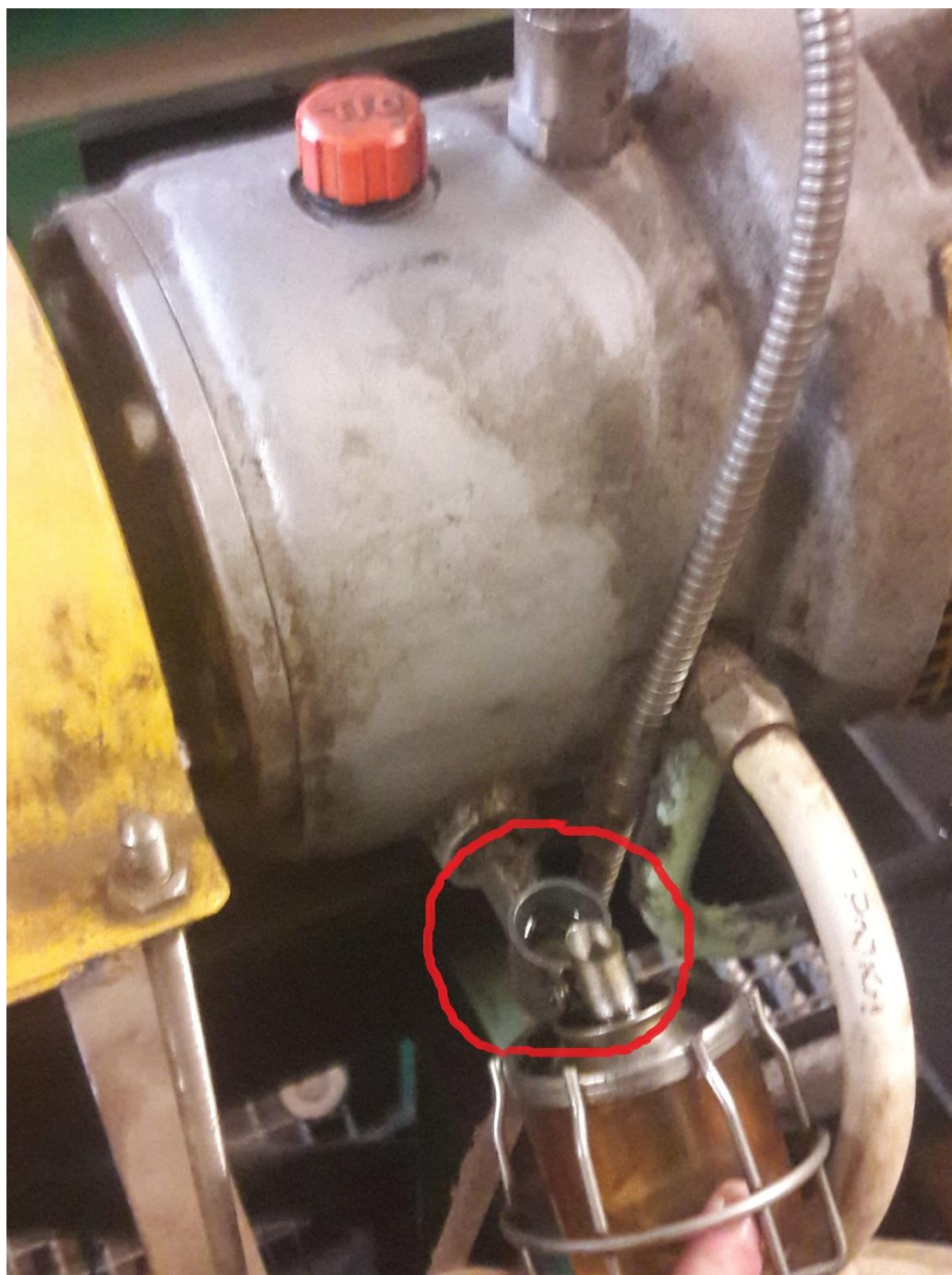
Obr. 21 Umiestnenie snímačov



Obr. 22 Umiestnenie snímačov

6.4 Odber vzoriek oleja

Vzorky olejov sa odoberali len od ložísk L3 a L4 v čerpadlách. Odberné miesto je vytvorené v konštrukcii čerpadla, takže odber nebol komplikovaný. Z dôvodu nízkeho objemu maziva v systémoch sa odoberalo len 100ml. Olej bol odoberaný striekačkou, ktorá je na obr.30.



Obr. 23 Odberné miesto ložísk L3 a L4



Obr. 24 Odberná striekačka

6.5 Postup merania

Meraniu predchádzalo zapojenie sond do prístroja A 4400 VA4 Pro. Prvý výstup meradla predstavoval horizontálne vibrácie, druhý vertikálne a tretí axiálne vibrácie. Meradlo sa skontrolovalo krátkym nameraním hodnôt a nahodením daných hodnôt do analyzátora, v ktorom sa skontrolovala reálnosť nameraných hodnôt. Strojné zariadenia sa merali jednotlivu z dôvodu dosiahnutia maximálneho zaťaženia. Aby sme sa čo najviac priblížili k plnému prevádzkovému stavu bola každá jednotka aspoň 20 min v chode pred začatím merania. Samotné získavanie dát sa začalo umiestnením sond s magnetmi. Umiestnenie je zobrazené v predchádzajúcej kapitole. Skontrolovalo sa uchytenie sond a začalo sa meranie. Na meranie sa využil modul s názvom recorder a dĺžka každého merania bola minimálne jedna minúta. Meranie sa uskutočnilo v dvoch dátumoch, medzi ktorými bola mesačná medzera. Obe merania sa vykonali pri rovnakých podmienkach a rovnakým postupom.

7 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

7.1 Doporučené hodnoty

Pri vyhodnocovaní nameraných hodnôt sa použila norma ČSN ISO 10 816-7. Mera-
nou a vyhodnocovanou veličinou je efektívna hodnota rýchlosti zrýchlenia v_{RMS} [mm/s].

Tabuľka 5 Doporučené hodnoty rýchlosti vibrácií v pásme 10-1000 Hz podľa ČSN ISO 10 816-7

Pásmo	Popis	Medza rýchlosti vibrácií Efektívna hodnota [mm/s]			
		Kategória		Kategória	
		≤200 kW	> 200kW	≤ 200kW	>200kW
A	Nové stroje v doporučenom rozsahu	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Neobmedzená prevádzka v dovolenom pracovnom rozsahu	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Obmedzená prevádzka	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Riziko poškodenia	>6,6	>7,6	>8,5	>9,5

Tabuľka 6 Doporučené hodnoty zrýchlenia vibrácií v pásme 500-25000 Hz

Rozhranie pásiem	Efektívna hodnota zrýchlenia vibrácií [g]
A/B	0,5
B/C	2
C/D	4

Doporučené hodnoty sú určené štyrmi pásmami:

- Pásmo A : V tomto pásme zvyčajne ležia vibrácie nových strojov.
- Pásmo B : Stroje s vibráciami v danom pásme môžu pracovať neobmedzene dlhý čas.
- Pásmo C : Stroje s vibráciami v danom pásme sa za bežných podmienok považujú za nedostatočné pre dlhodobú a trvalú prevádzku.

- Pásmo D : Vibrácia nadobúdajúce týchto hodnôt sa považujú natoľko nebezpečné, že môžu spôsobiť poškodenie stroja.

Tabuľka 7 Vlastnosti použitého oleja dané výrobcom

Názov	Bod vzplnutia [°C]	Teplotný rozsah	Viskozita [mm ²] pri 40 ⁰	Viskozita [mm ²] pri 100 ⁰	Hustota pri 15 °C
Turmofluid GV32	220	-50/+80	33	6.1	0822

Tabuľka 8 Prvková analýza referenčného oleja

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stanovená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika			5	83,5
obsah Cu					5	4,1
obsah Cr					5	17,3
obsah Sn					5	<3
obsah Si					10	101,3
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				682,1
obsah P						1946
obsah Na						2613
obsah Zn						60,5
obsah Ca						<10

Po vykonanej prvkovej analýze referenčného oleja, ktorej výsledky sú zobrazené v tabuľke 8 sa môže konštatovať, že už samotný olej z kanistru je znečistený.

7.2 Namerané hodnoty

Získané dáta sa stiahli z A4410 VA4 PRO do počítača, kde sa rozoberali. K tomu sa využil program, taktiež od firmy Adash, A4410 Virtual Unit.

7.2.1 Merané zariadenie A

Motor+čerpadlo A- **technický stav ZHORŠENÝ/ olej NEPRIJATELNÝ**

Tabuľka 9 Namerané hodnoty čerpadla A

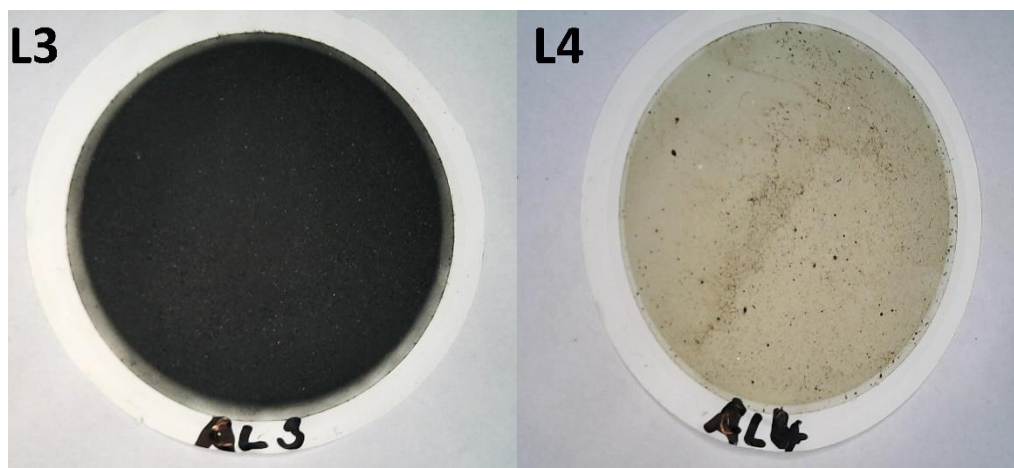
Tabuľka efektívnych hodnôt rýchlosti vibrácií v pásme 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektívne hodnoty zrýchlenia vibrácií v pásme od 500 – 25600 Hz (a_{RMS})									
Popis		motor		čerpadlo					
Meracie miesta		L1	L2	L3	L4				
Veličina	Smer								
Max. ot/min		2980		2980					
v_{RMS} [mm/s]	V	0,72	1,33	1,10	0,73				
	H	0,75	1,03	1,71	1,32				
	A	0,58	1,78	0,42	0,85				
a_{RMS} [g] 500 – 25600 Hz	V	2,02	2,42	0,60	0,62				
	H	1,57	2,36	0,69	0,55				
	A	1,79	2,97	0,33	0,72				
Pozn.		so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením				

Tabuľka 10 Rozbor oleja čerpadla A L3

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano-vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	30,84
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,0044
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	56,6
obsah Cu				50	80	3,9
obsah Cr				12,5	15	19,4
obsah Sn				15	30	< 3,0
obsah Si				30	60	366,2
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				1361
obsah P						1204
obsah Na						6024
obsah Zn						44,9
obsah Ca						15,6

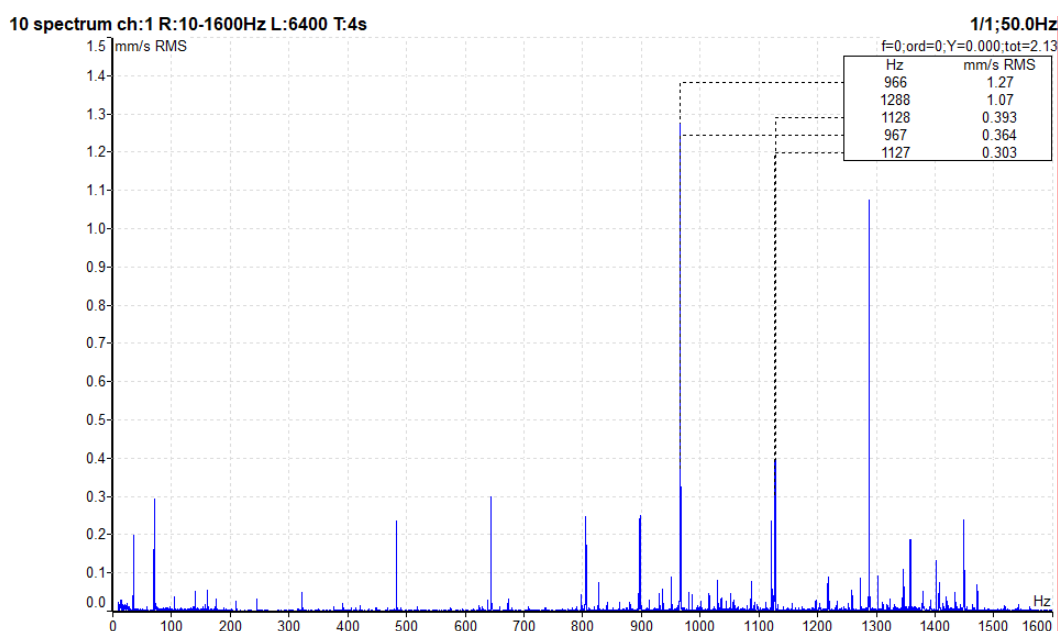
Tabuľka 11 Rozbor oleja čerpadla A L4

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano-vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	31,368
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,0092
Trieda čistoty		ČSN ISO 4406				23/19/17
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	145,1
obsah Cu				50	80	3,8
obsah Cr				12,5	15	19,4
obsah Sn				15	30	< 3
obsah Si				30	60	47,3
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				717,3
obsah P						1701
obsah Na						6162
obsah Zn						34,1
obsah Ca						< 10

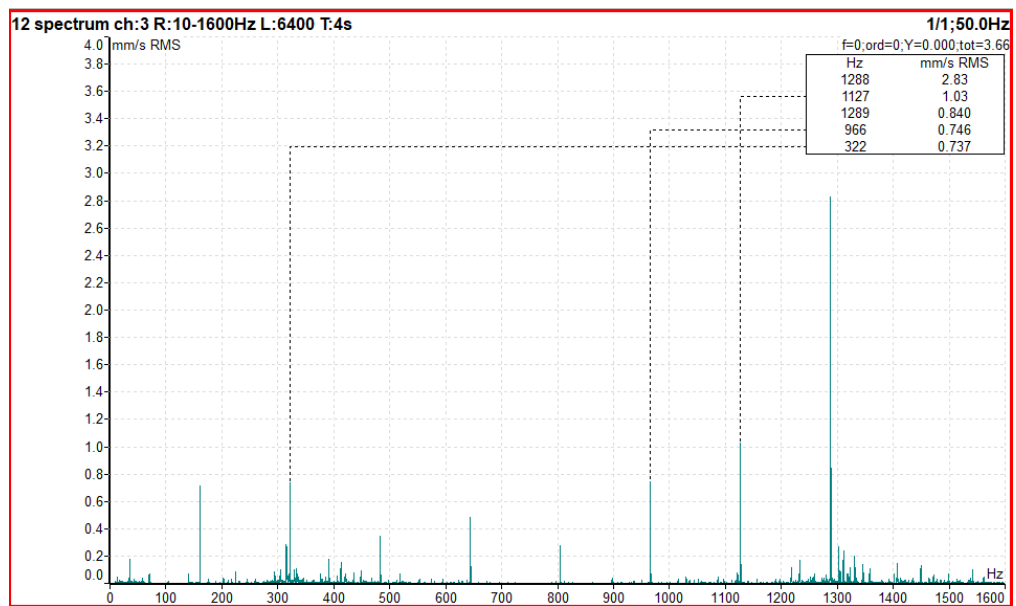


Obr. 25 Výsledné filtre ložísk L3 a L4

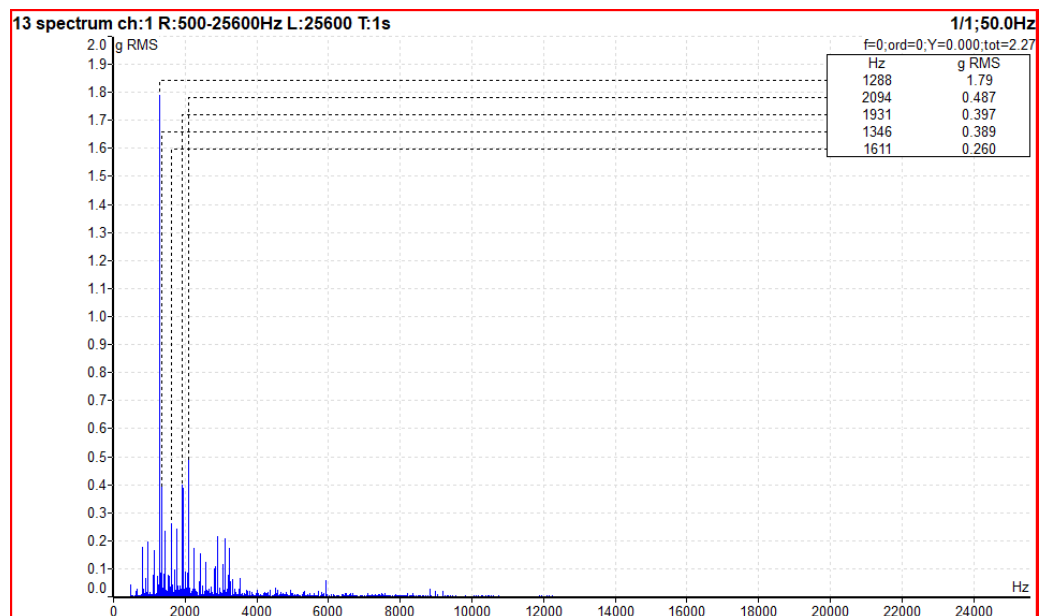
V prípade čerpadla a motora A sa všetky hodnoty efektívnej rýchlosti vibrácií nachádzajú v pásme A/B, čiže sú absolútne v poriadku. Zvyšujúce sa hodnoty efektívneho zrýchlenia na oboch ložiskách motora, predovšetkým na L2, môžu predikovať vznikajúcu poruchu. Výsledky testov oleja L3 a L4 na obsah vody a viskozitu neprekročili dovolené hodnoty. Po prvkovej analýze sa zistil vysoký pokles fosforu (aditívum) a prekročené medze obsahu chrómu a kremíka. Obsah železa odpovedá bežnému opotrebeniu. Testy na prítomnosť mechanických nečistôt objavili katastrofálne znečistenie oleja, v prípade L3 bol filter natoľko zanesený, že nebolo možné určiť triedu čistoty. V prípade L4 prekročil obsah chrómu povolenú medzu a množstvo železa je zvýšené. Z týchto dôvodov hodnotím stav oleja na neprijateľný.



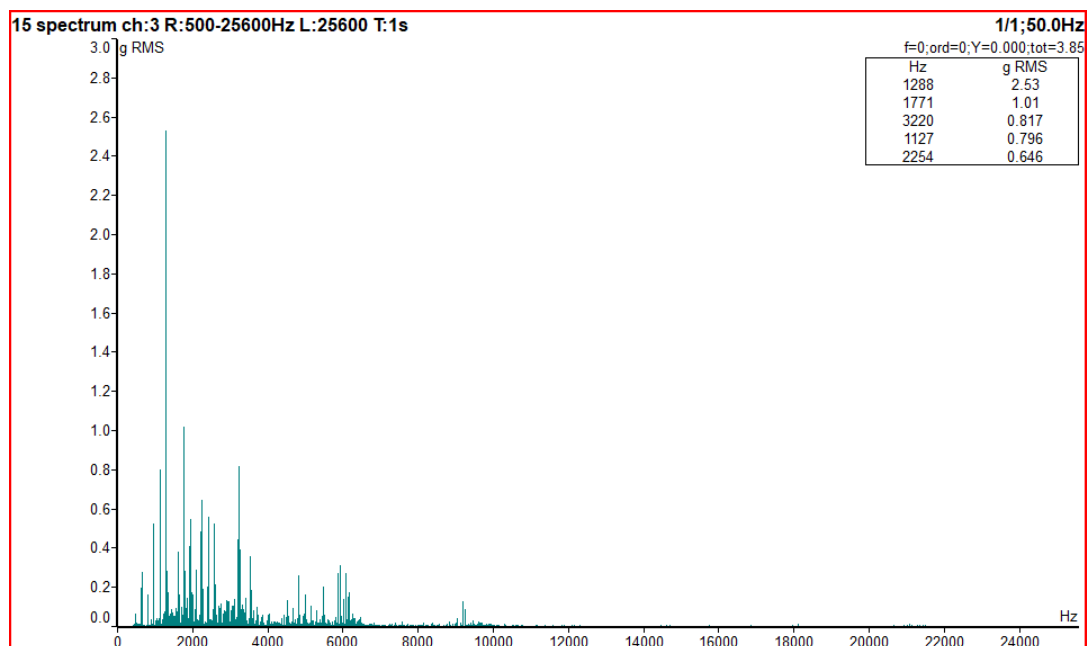
Obr. 26 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií ložiska L2 (vertikálna sonda)



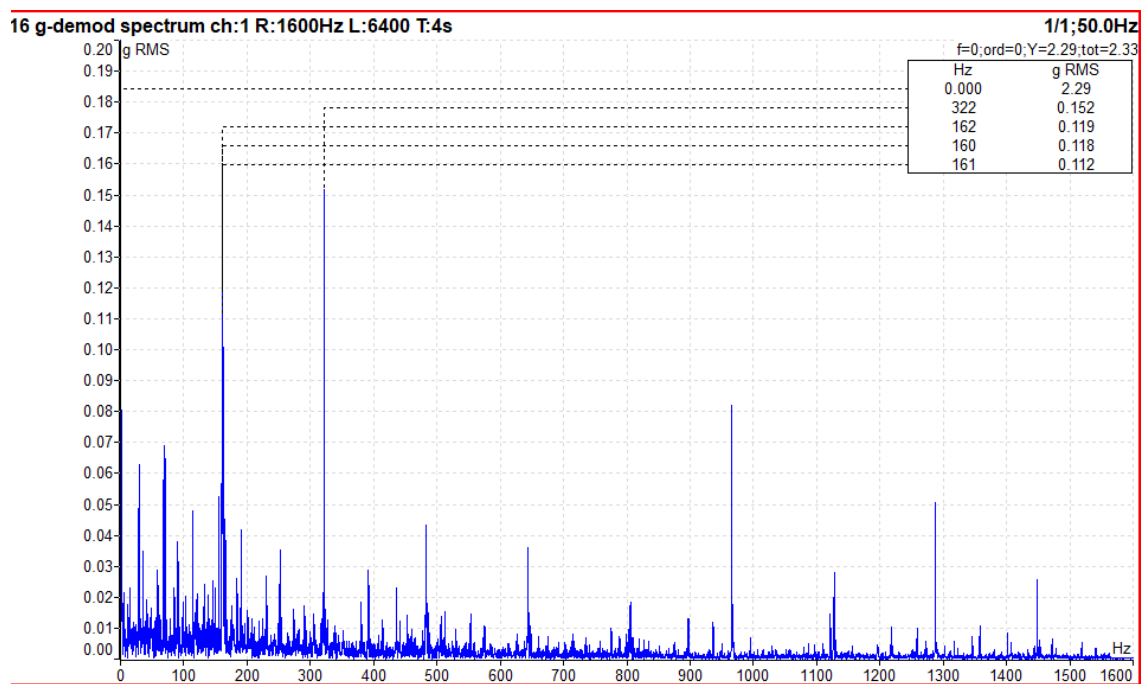
Obr. 27 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L2 (axiálna sonda)



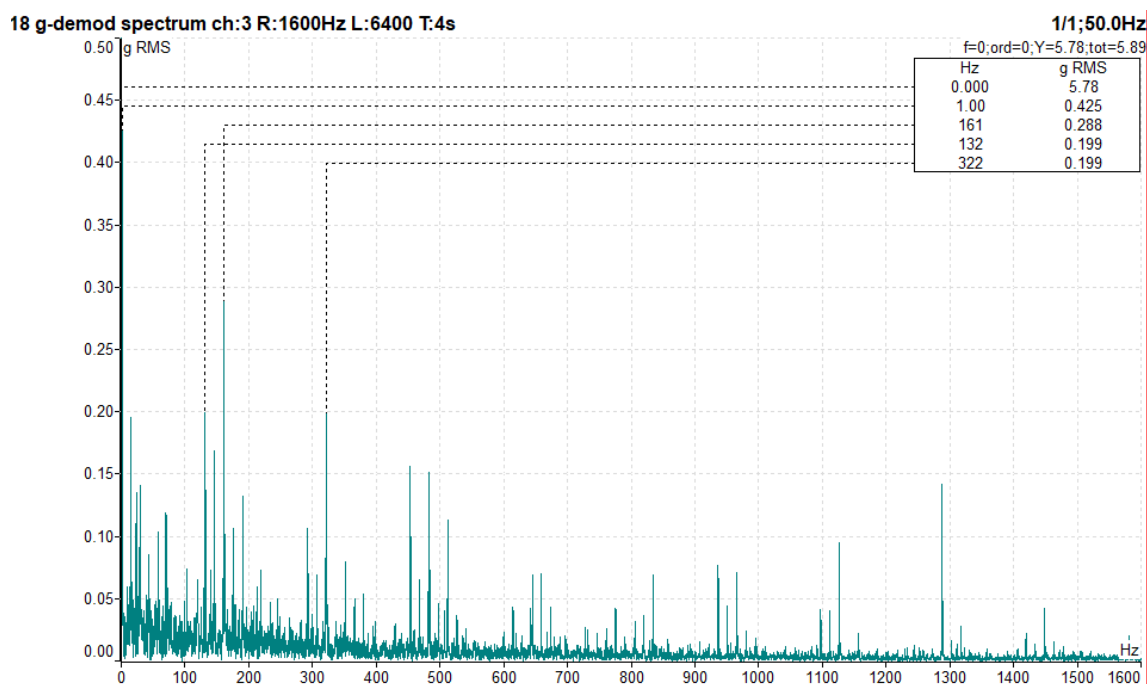
Obr. 28 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2(vertikálna sonda)



Obr. 29 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií L2 (axiálna sonda)



Obr. 30 Obálka zrýchlenia L2 (vertikálna sonda)



Obr. 31 Obálka zrýchlenia L2 (vertikálna sonda)

7.2.2 Merané zariadenie B

Motor+čerpadlo B- **technický stav NEPRIJATELNÝ/olej NEPRIJATELNÝ**

Tabuľka 12 Namerané hodnoty čerpadla B

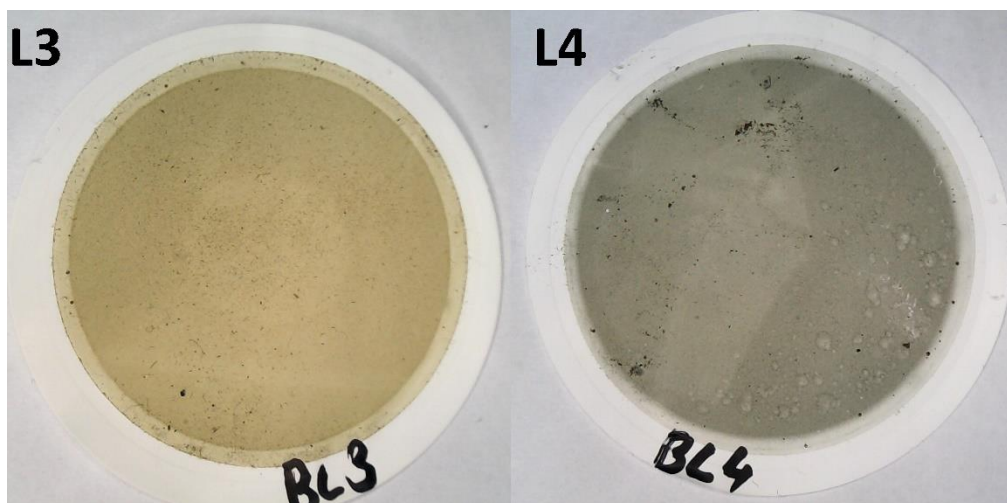
Tabuľka efektívnych hodnôt rýchlosti vibrácií v pásme 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektívne hodnoty zrýchlenia vibrácií v pásme od 500 – 25600 Hz (a_{RMS})									
Popis		motor		čerpadlo		motor po premazaní			
Meracie miesta		L1	L2	L3	L4	L1	L2		
Veličina	Smer								
Max. ot/min		2980		2980		2980			
v_{RMS} [mm/s]	V	1,28	2,53	1,15	0,99	1,85	2,65		
	H	0,89	1,22	0,87	0,87	0,983	1,14		
	A	0,58	4,65	0,33	0,91	0,988	8,53		
a_{RMS} [g] 500 – 25600 Hz	V	4,73	6,32	0,53	0,36	3,73	3,58		
	H	3,08	3,03	0,49	0,31	3,74	3,60		
	A	3,05	11,01	0,41	0,81	5,74	6,11		
Pozn.		so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením		

Tabuľka 13 Rozbor oleja čerpadla B L3

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano-vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	31,44
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,0112
Trieda čistoty		ČSN ISO 4406				24/19/17
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	32,6
obsah Cu				50	80	4,3
obsah Cr				12,5	15	17,7
obsah Sn				15	30	<3
obsah Si				30	60	162,3
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				574,8
obsah P						2002
obsah Na						2784
obsah Zn						26,1
obsah Ca						9,5

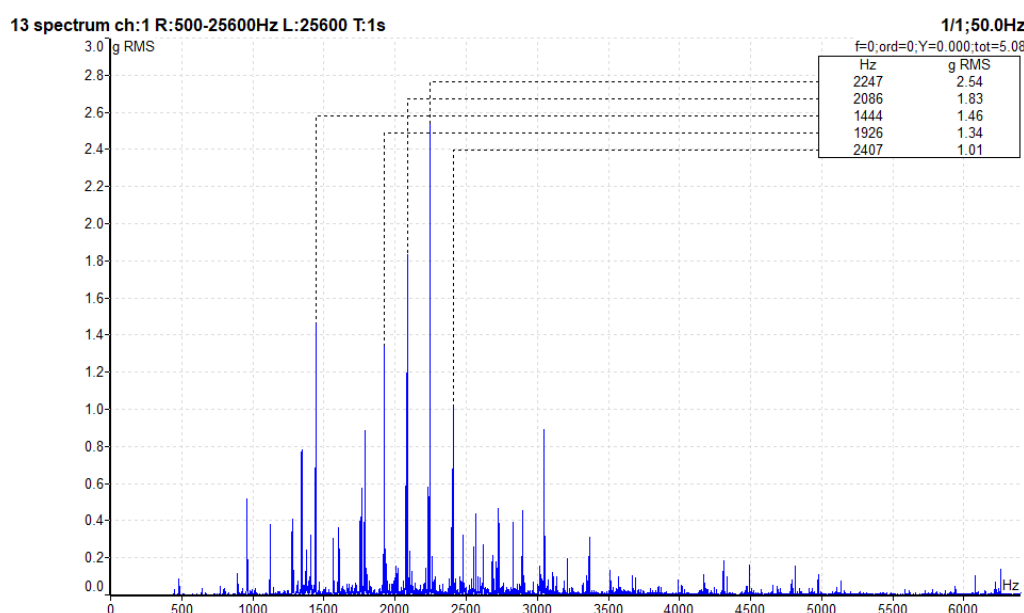
Tabuľka 14 Rozbor oleja čerpadla B L4

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano-vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	31,47
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,0177
Trieda čistoty		ČSN ISO 4406				25/20/17
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	114,7
obsah Cu				50	80	4,4
obsah Cr				12,5	15	15,9
obsah Sn				15	30	<3
obsah Si				30	60	1,5
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				660,2
obsah P						1981
obsah Na						2809
obsah Zn						42,5
obsah Ca						<10

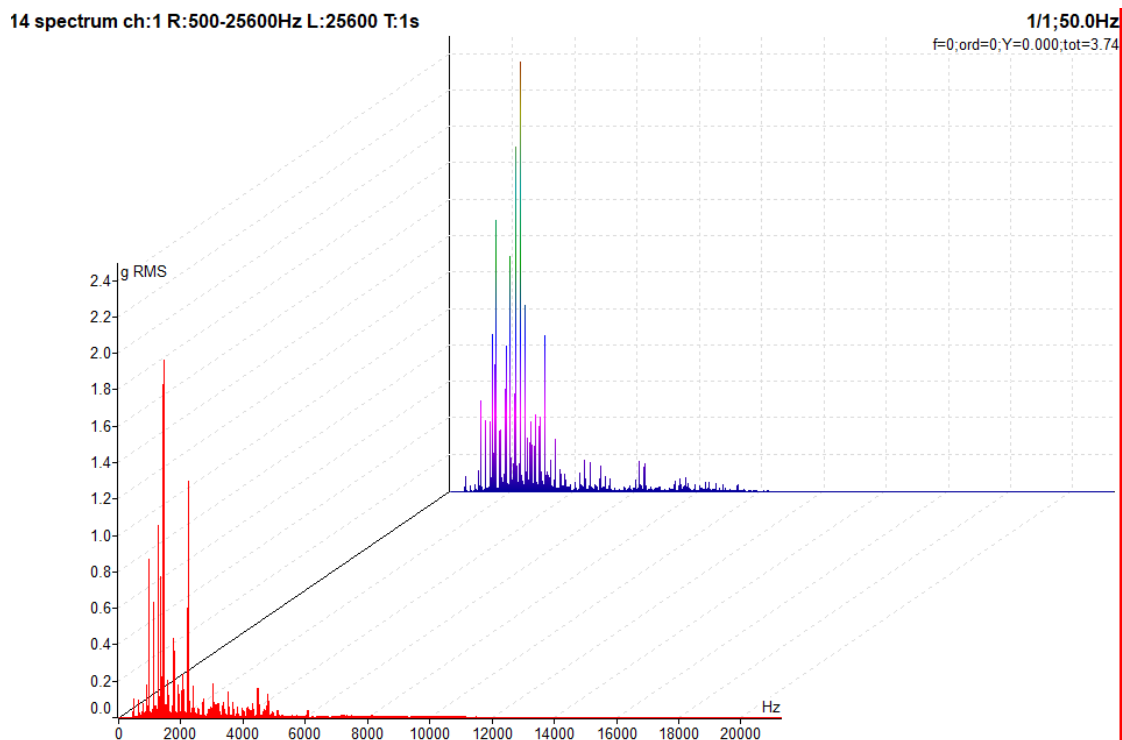


Obr. 32 Výsledné filtre ložísk L3 a L4

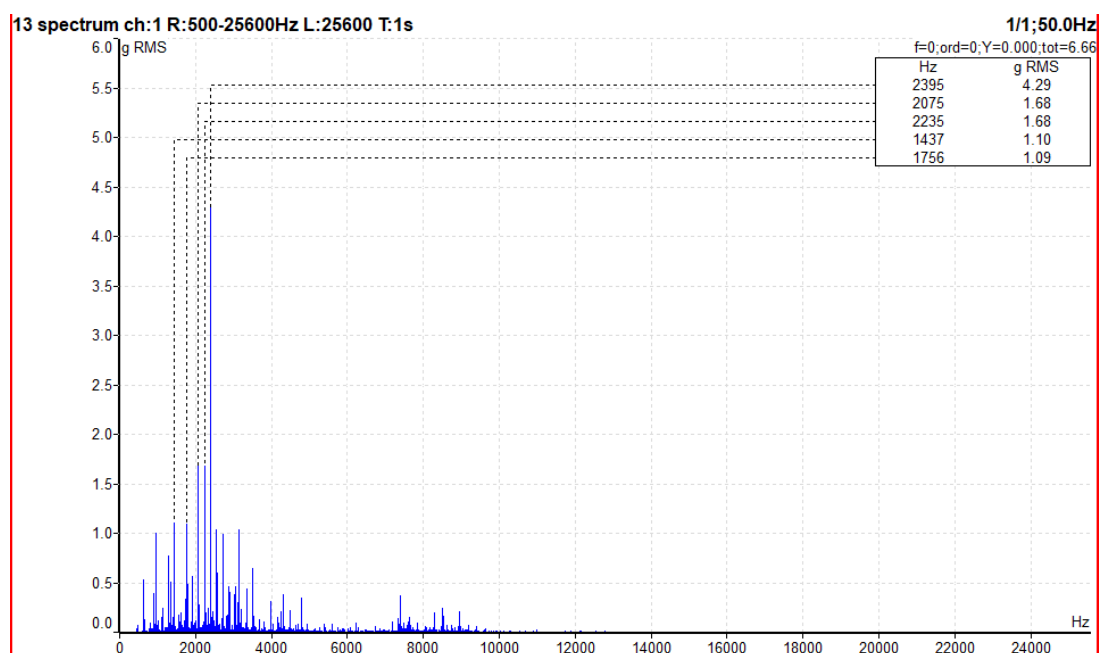
Na meranej jednotke B zvýšené hodnoty vibrácií a to predovšetkým na ložisku L2 motora ale aj na ložisku L1. Jednotlivé spektrá prekračujúcich hodnôt sú zobrazené na obr. 31 až 33. Meranie sa zopakovalo ešte raz ale v tomto prípade už po premazaní ložísk motora. Spektrá sú zobrazené na obrázkoch 38,40,42 a 44. Aj po premazaní hodnoty presahovali dovolenú hranicu a preto je technický stav zhodnotený za neprijateľný. Niektoré hodnoty získane rozbormi olejov ložísk L3 a L4 prekračujú dovolené množstva ako zobrazené v tabuľkách 13 a 14. Obsah železa oboch ložísk odpovedajú bežnému opotrebeniu. Množstvo mechanických nečistôt L3 a L4 je vyjadrené triedou čistoty v tabuľkách 13 a 14. Vzhľadom na zvýšené obsahy daných prvkov a obrovské množstvo mechanických nečistôt hodnotím stav oleja za neprijateľný.



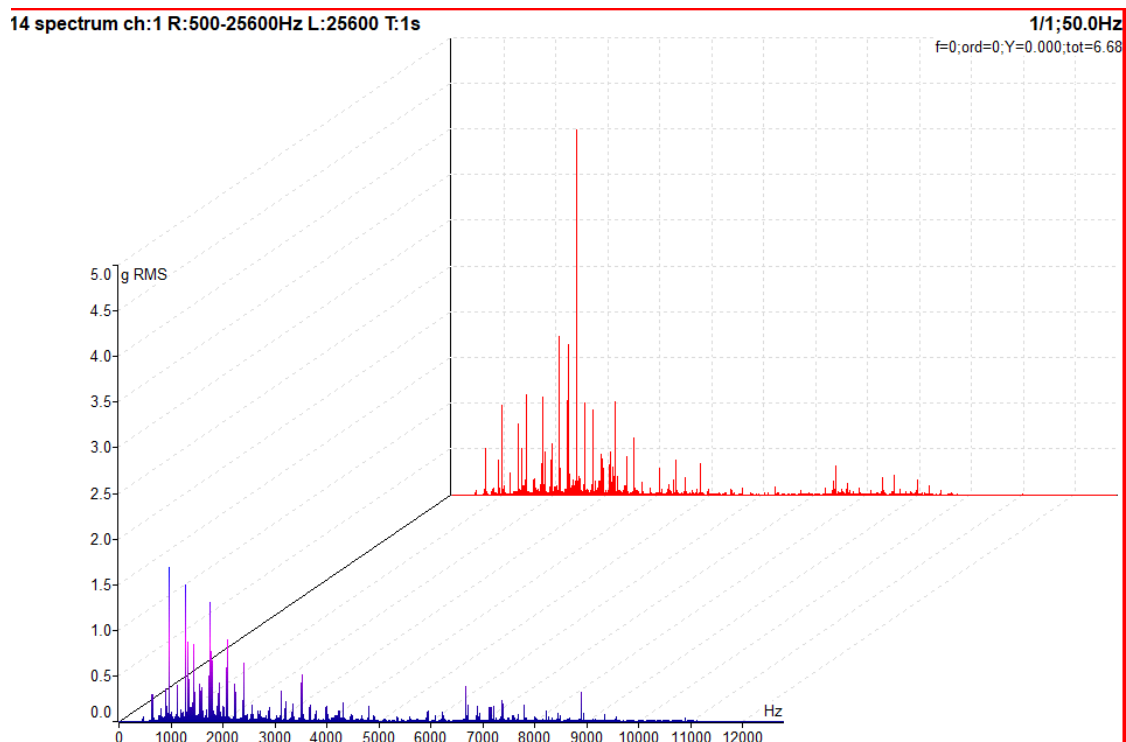
Obr. 33 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L1 motora (vertikálna sonda)



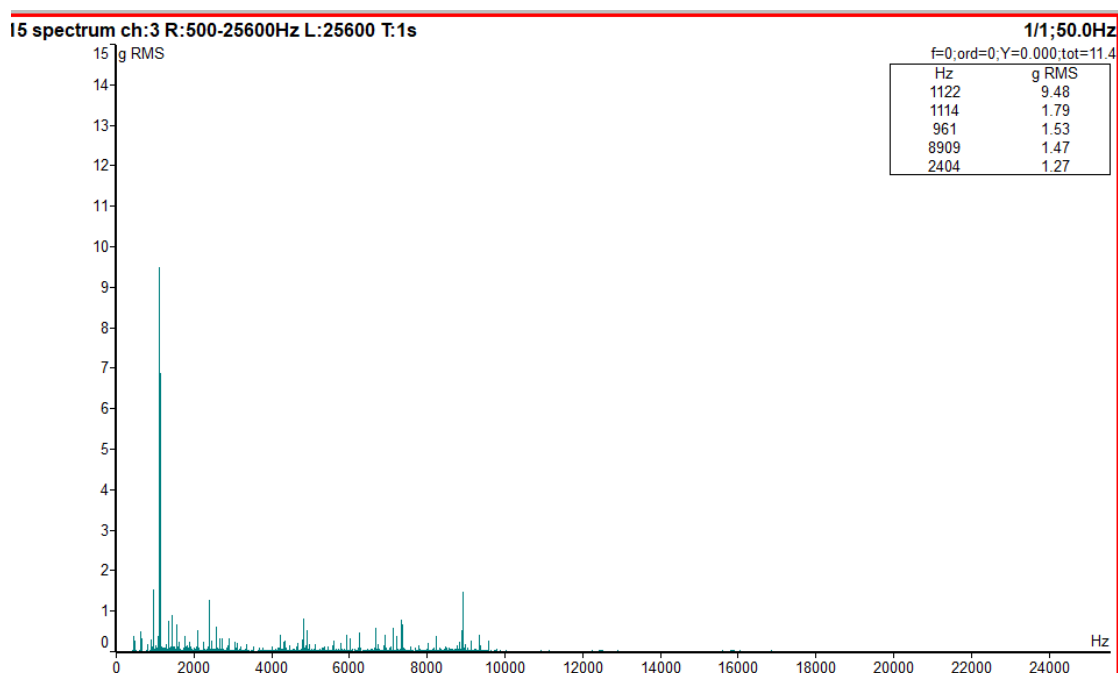
Obr. 34 Porovnanie frekvenčných spektier efektívneho zrýchlenia (vertikálna sonda) ložiska L1 pred a po premazaní (vzadu pred premazaním)



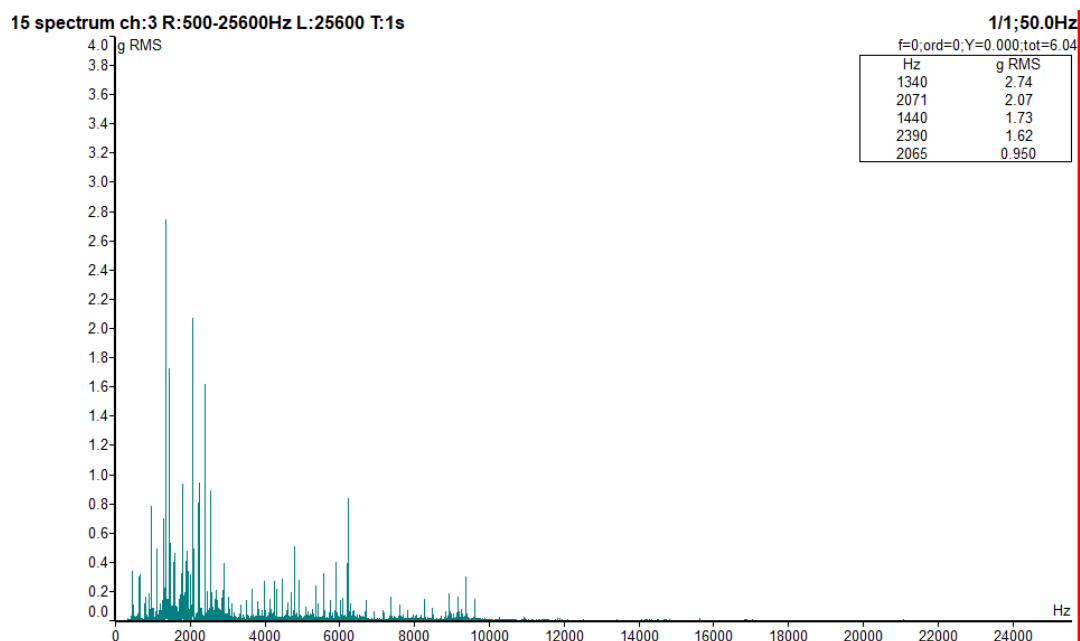
Obr. 35 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (vertikálna sonda)



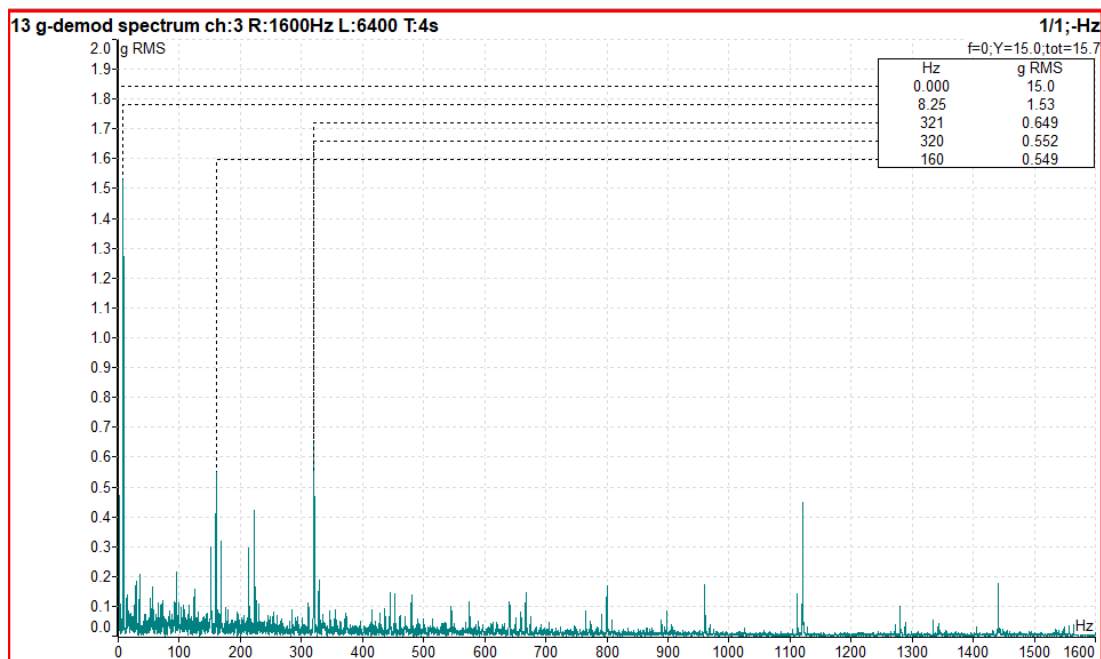
Obr. 36 Porovnanie frekvenčných spektier efektívneho zrýchlenia (vertikálna sonda) ložiska L2 pred a po premazaní (vzadu pred premazaním)



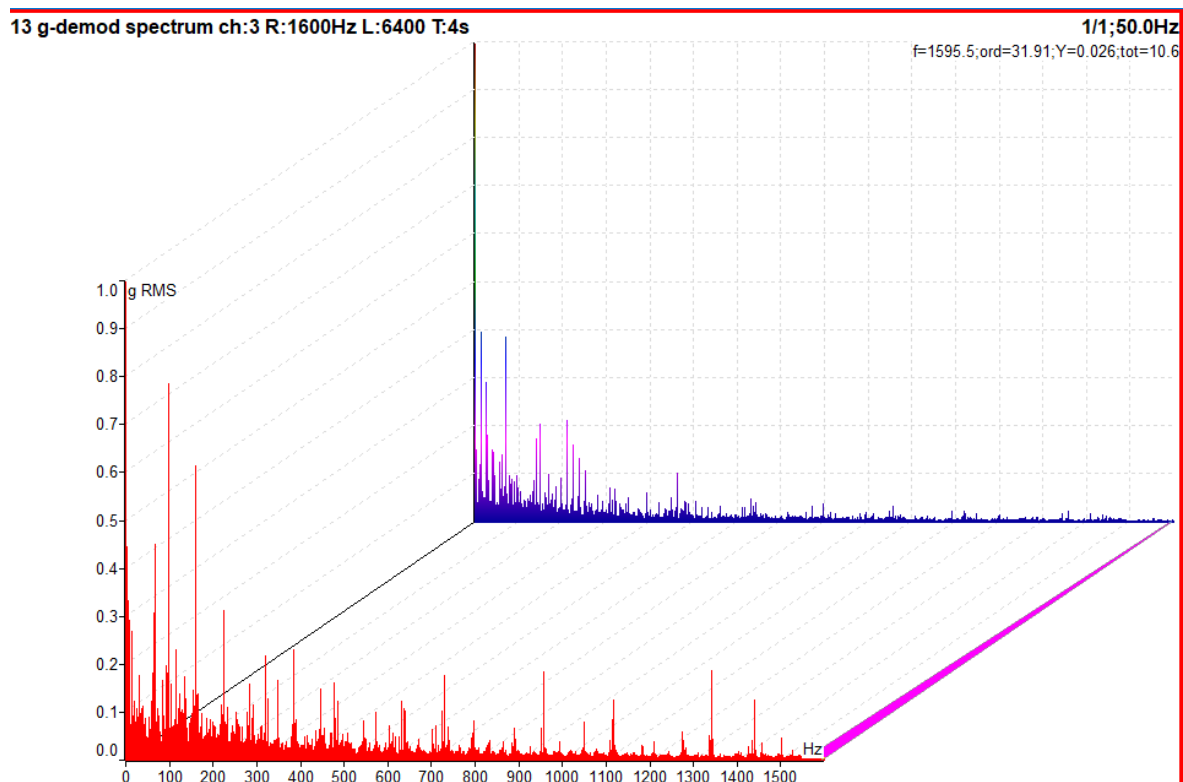
Obr. 37 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 (axiálna sonda)



Obr. 38 Frekvenčné spektrum efektívneho zrýchlenia vibrácií ložiska L2 (axiálna sonda) po premazaní plastickým mazivom

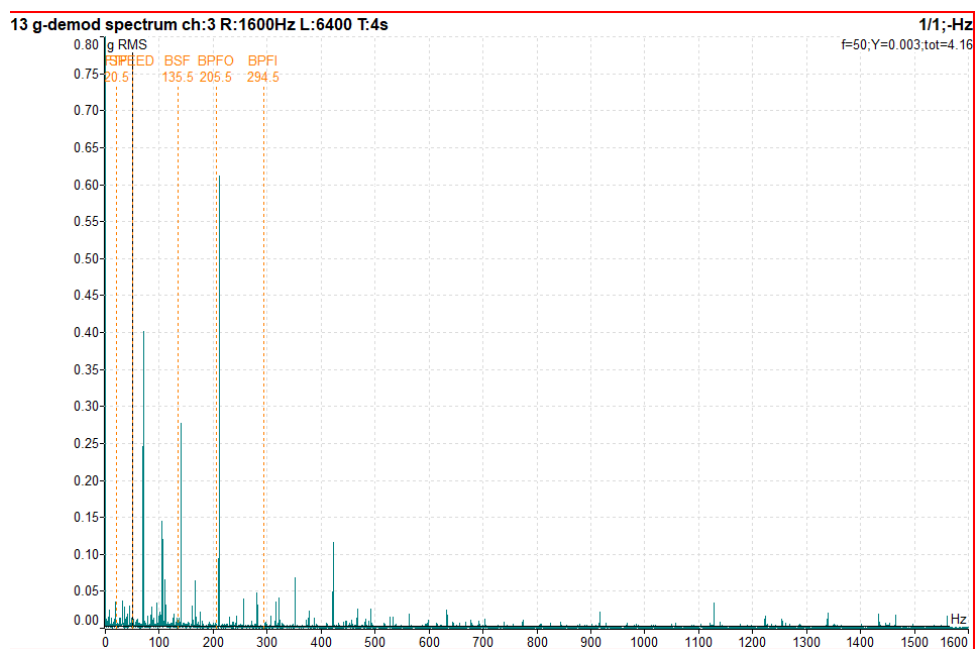


Obr. 39 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda)



Obr. 40 Porovnanie obálok zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda) pred a po premazaní (vzadu po premazaní)

Vibrácie od ložiska motora L2, ktoré sa získali použitím obáľkovej metódy, dosahujú veľmi vysokých hodnôt a z toho dôvodu využívam ďalšiu možnosť v Adash, A4410 Virtual Unit a to doplnenie spektra o poruchové frekvencie ložiska SKF 6212-2Z/C3.



Obr. 41 Obálka zrýchlenia s poruchovou frekvenciou ložiska L2

Speed = rýchlosť [Hz]

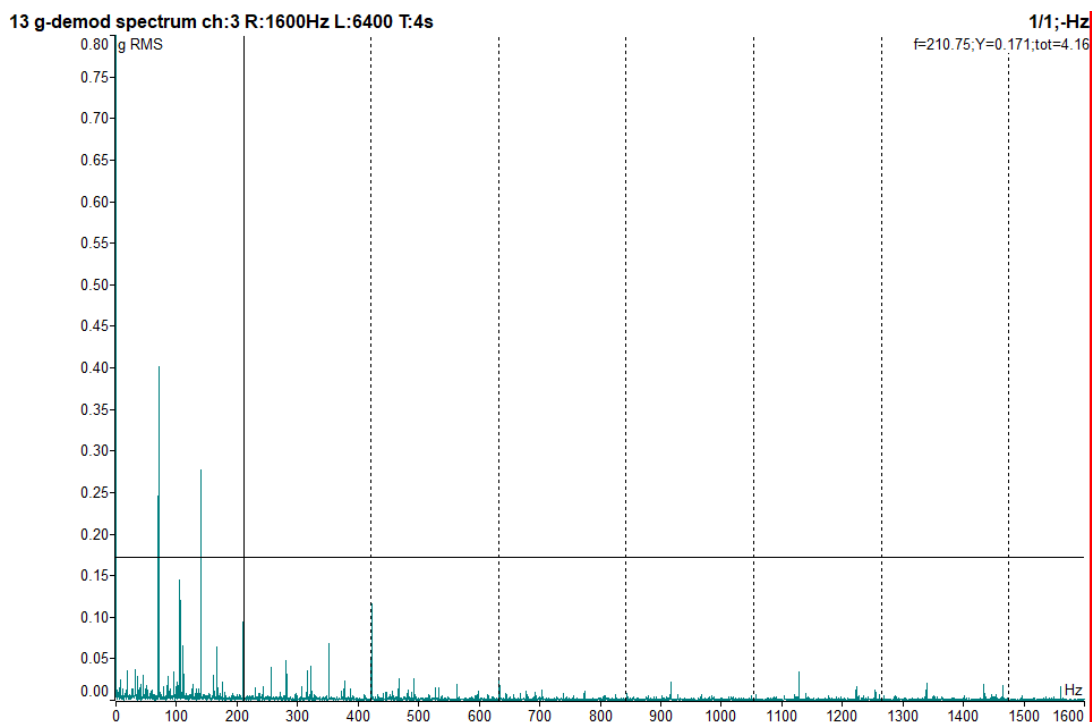
FTF (Fundamental Train Frequency) = frekvencia defektu kletky ložiska

BPFO (Ball Pass Frequency of Outer ring) = frekvencia defektu vonkajšieho krúžku

BSF (Ball Spin Frequency) = frekvencia defektu valivého telieska

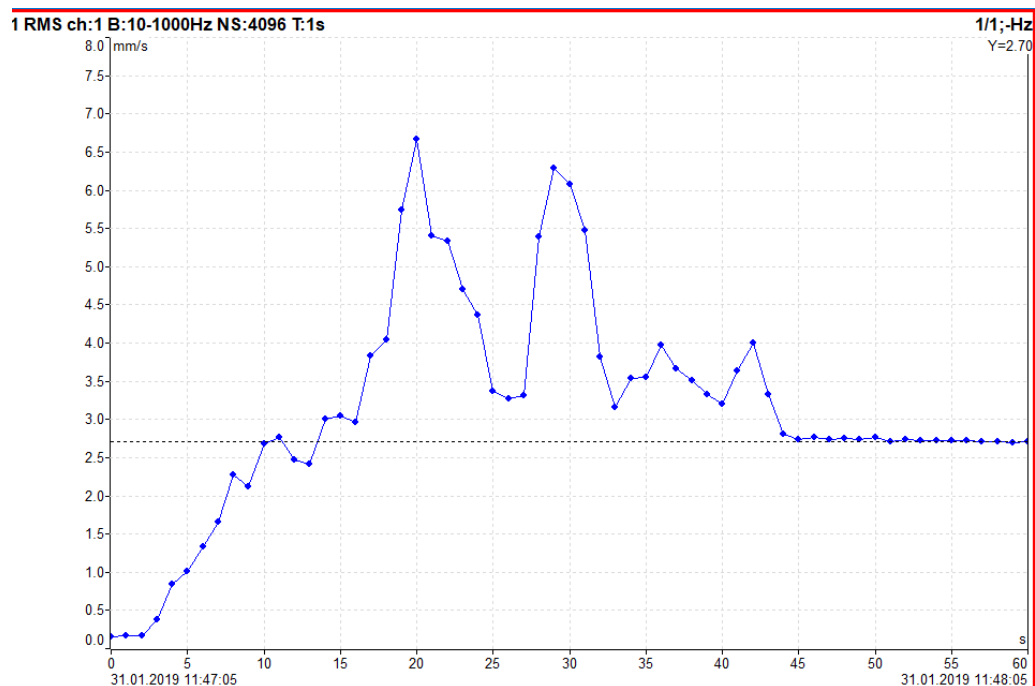
BPFI (Ball Pass Frequency of Inner ring) = frekvencia defektu vnútorného krúžku

Pre zadanú rýchlosť 50Hz sa vykreslilo spektrum na obr. 34. Na obrázku sú zobrazené frekvencie jednotlivých častí ložiska. Najvyššia špička prechádza cez BPFO, čiže cez frekvenciu vonkajšieho krúžku.

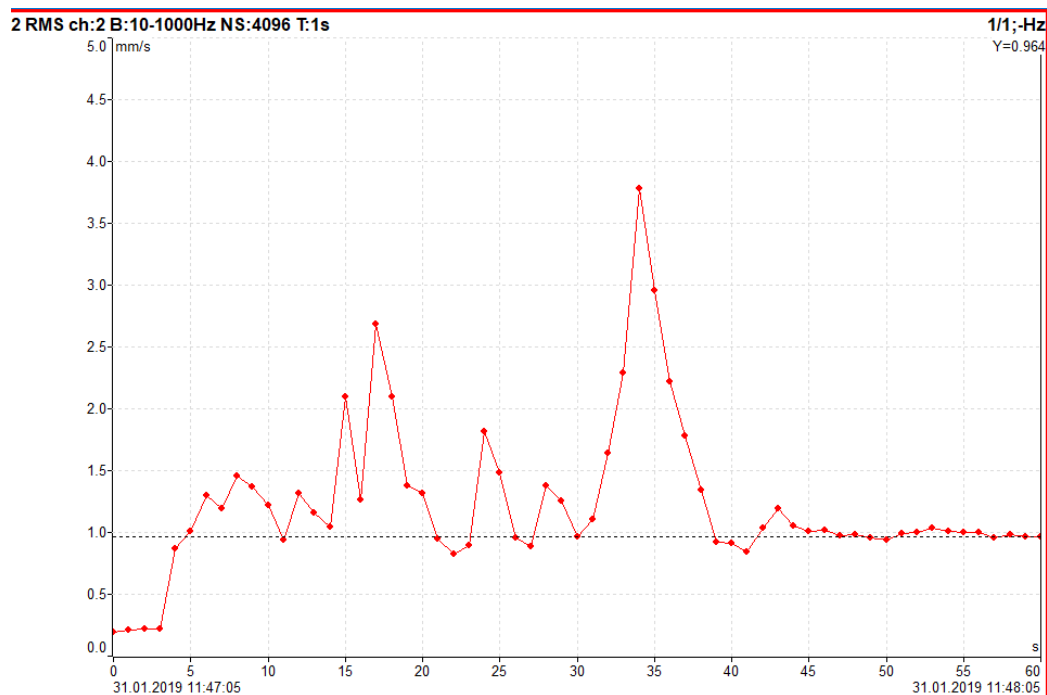


Obr. 42 Obálka zrýchlenia s harmonickým kurzorom cez BPFO

Použitím harmonického kurzora môžeme vidieť násobky frekvencie defektu vonkajšieho krúžku ložiska L2.



Obr. 43 Rozbeh efektívnej rýchlosti L2 (vertikálna sonda)



Obr. 44 Rozbeh efektívneho zrýchlenia L2 (vertikálna sonda)

7.2.3 Merané zariadenie C

Motor+čerpadlo A- **technický stav ZHORŠENÝ** / olej **NEPRIJATELNÝ**

Tabuľka 15 Namerané hodnoty čerpadla C

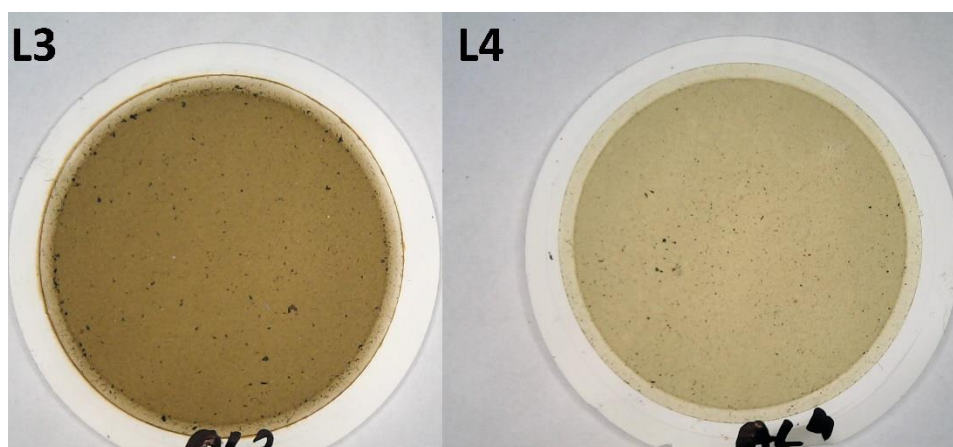
Tabuľka efektívnych hodnôt rýchlosti vibrácií v pásme 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektívne hodnoty zrýchlenia vibrácií v pásme od 500 – 25600 Hz (a_{RMS})									
Popis		motor		čerpadlo					
Meracie miesta		L1	L2	L3	L4				
Veličina	Smer								
Max. ot/min		2980		2980					
v_{RMS} [mm/s]	V	0,89	1,14	1,18	1,26				
	H	1,19	1,26	1,76	1,31				
	A	0,62	4,01	0,44	1,32				
a_{RMS} [g] 500 – 25600 Hz	V	1,21	1,23	0,38	0,34				
	H	0,92	0,66	0,38	0,34				
	A	1,70	1,51	0,25	0,62				
Pozn.		so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením	so zaťažením				

Tabuľka 16 Rozbor oleja čerpadla C L3

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano- vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	31,24
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,018
Trieda čistoty		ČSN ISO 4406				24/19/17
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	78,2
obsah Cu				50	80	4,3
obsah Cr				12,5	15	16,3
obsah Sn				15	30	<3
obsah Si				30	60	83,6
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				524,1
obsah P						1957
obsah Na						2591
obsah Zn						7,9
obsah Ca						<10

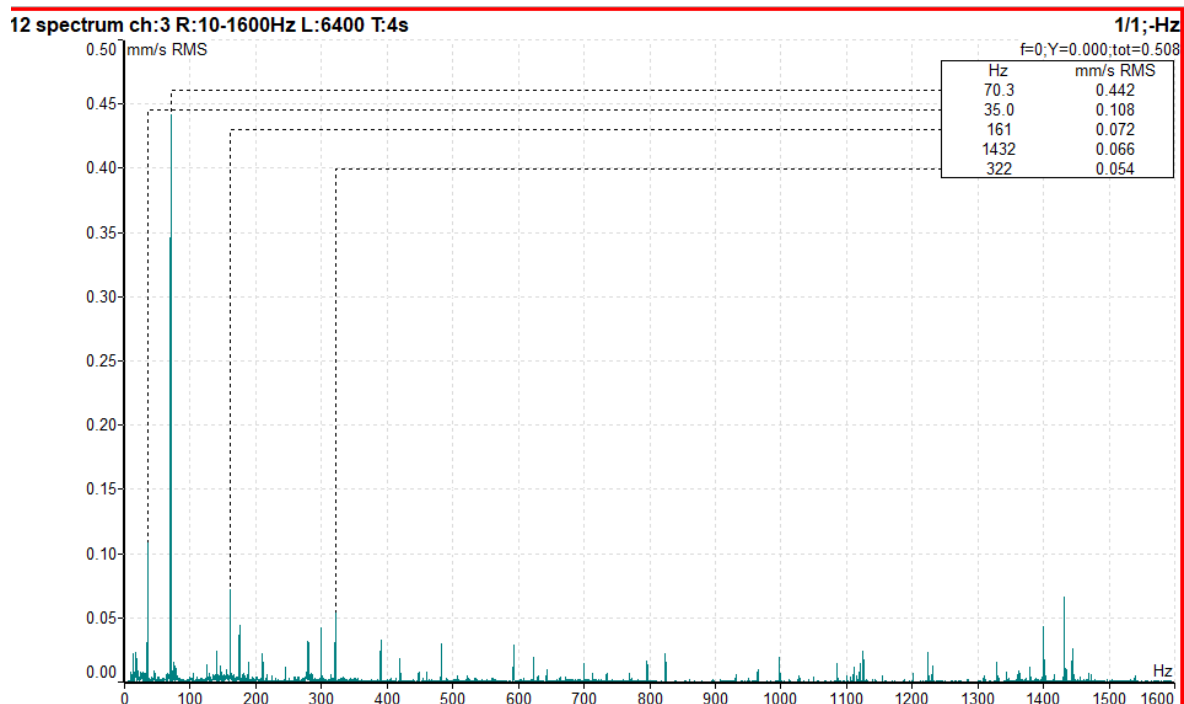
Tabuľka 17 Rozbor oleja čerpadla C L4

Parameter kvality	Rozmer	Metoda	Požadov. hodnota			Stano- vená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita pri 40°C	mm²/s	ČSN EN ISO 3104	29		35	31,47
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937			0,2	0,0157
Trieda čistoty		ČSN ISO 4406				24/19/17
Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		80	150	81,5
obsah Cu				50	80	4,4
obsah Cr				12,5	15	16,2
obsah Sn				15	30	<3
obsah Si				30	60	77,5
Aditívna, degradácie						hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika				640,5
obsah P						1901
obsah Na						2549
obsah Zn						59,3
obsah Ca						<10

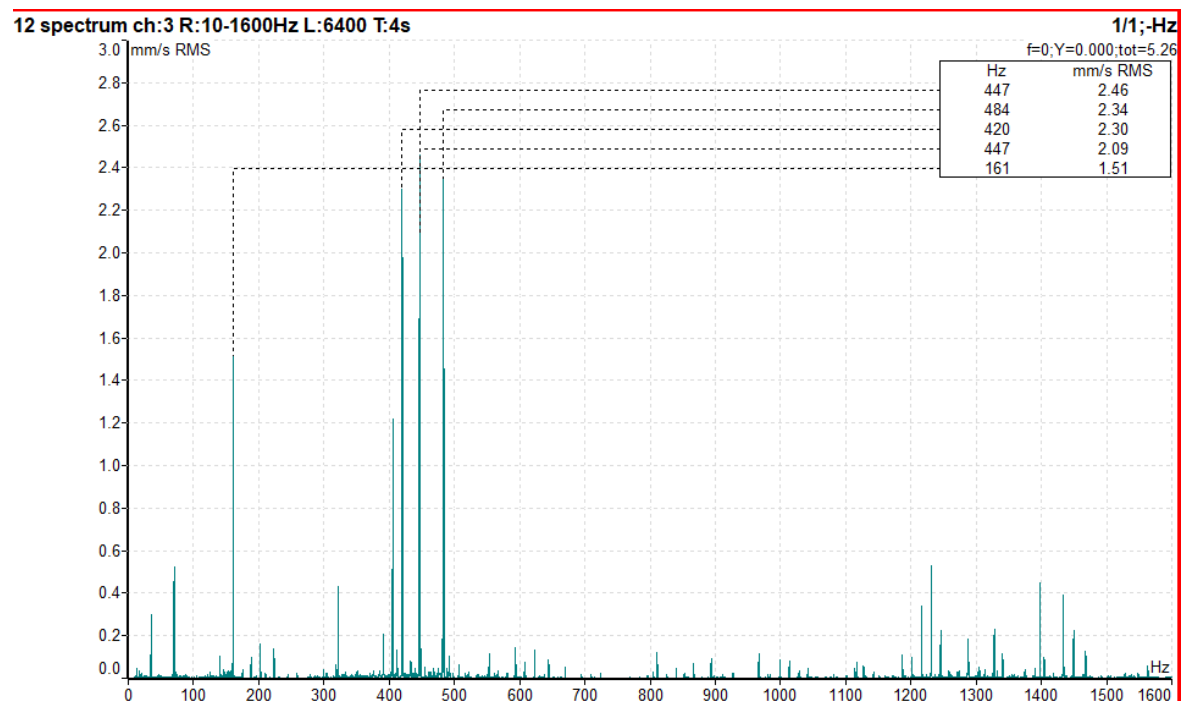


Obr. 45 Výsledné filtre ložísk L3 a L4

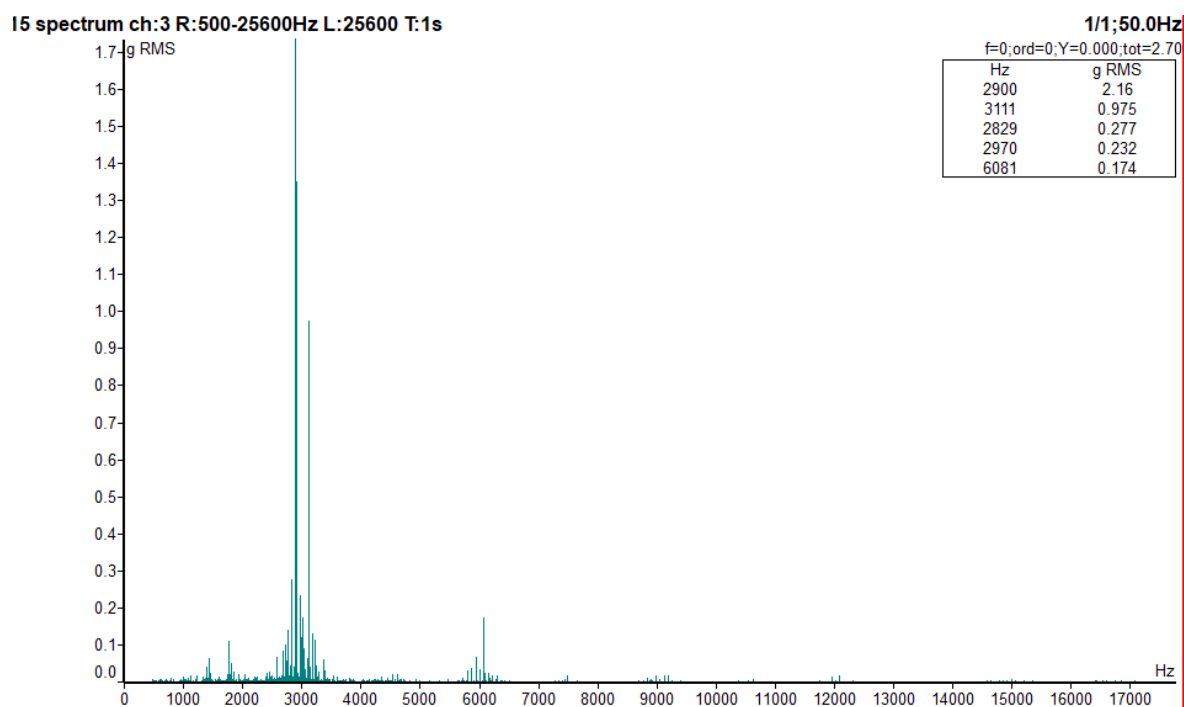
V poslednom prípade je väčšina hodnôt vyhovujúca. Zvýšené sú hodnoty efektívneho zrýchlenia v axiálnom smere odpovedajúce motorovým ložiskám spolu s efektívnou hodnotou rýchlosti v axiálnom smere na L2 zasahujú do pásma, ktoré hodnotí jeho technický stav za zhoršený. Hodnoty železa ložísk L3 a L4 odpovedajú bežnému opotrebeniu. V tabuľkách 16 a 17 sú ukázané prekročené hodnoty prvkov a pri L3 aj nežiadúci pokles zinku (aditíva). Skúmaním filtrov zobrazených na obrázku 45 sa určila trieda čistoty oleja. Zistené množstvo mechanických nečistôt je obrovské. Z týchto dôvodov sa stav oleja považuje za neprijateľný.



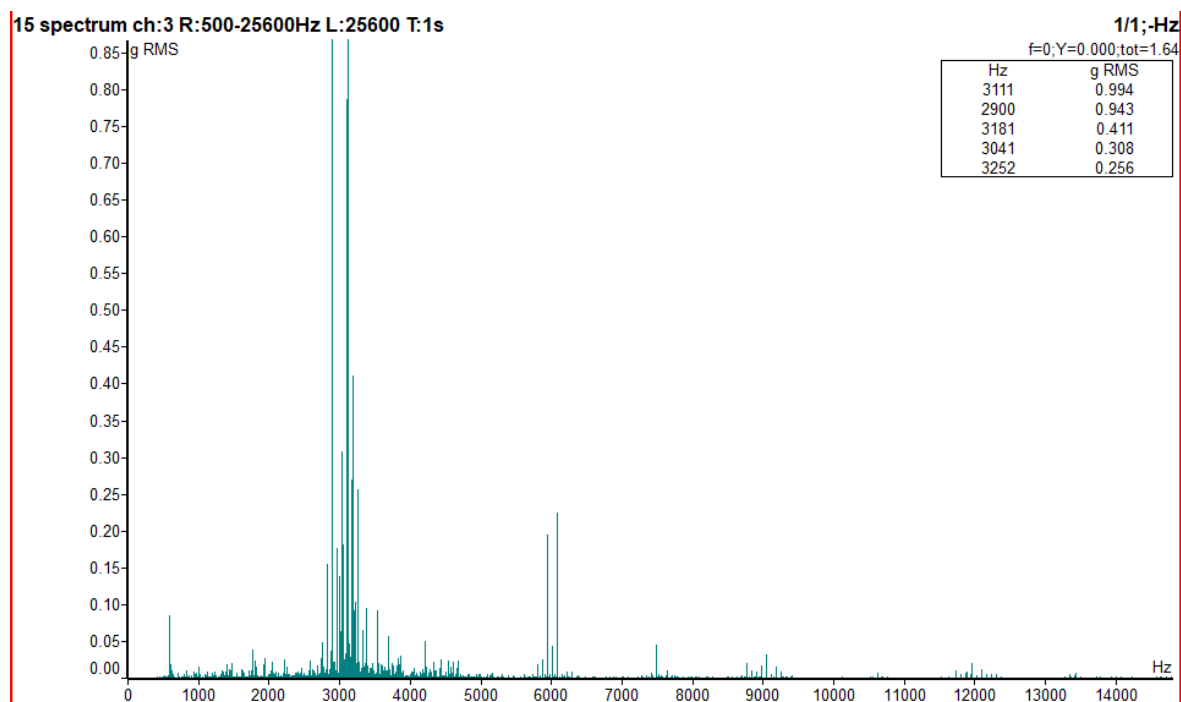
Obr. 46 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L1 (axiálna sonda)



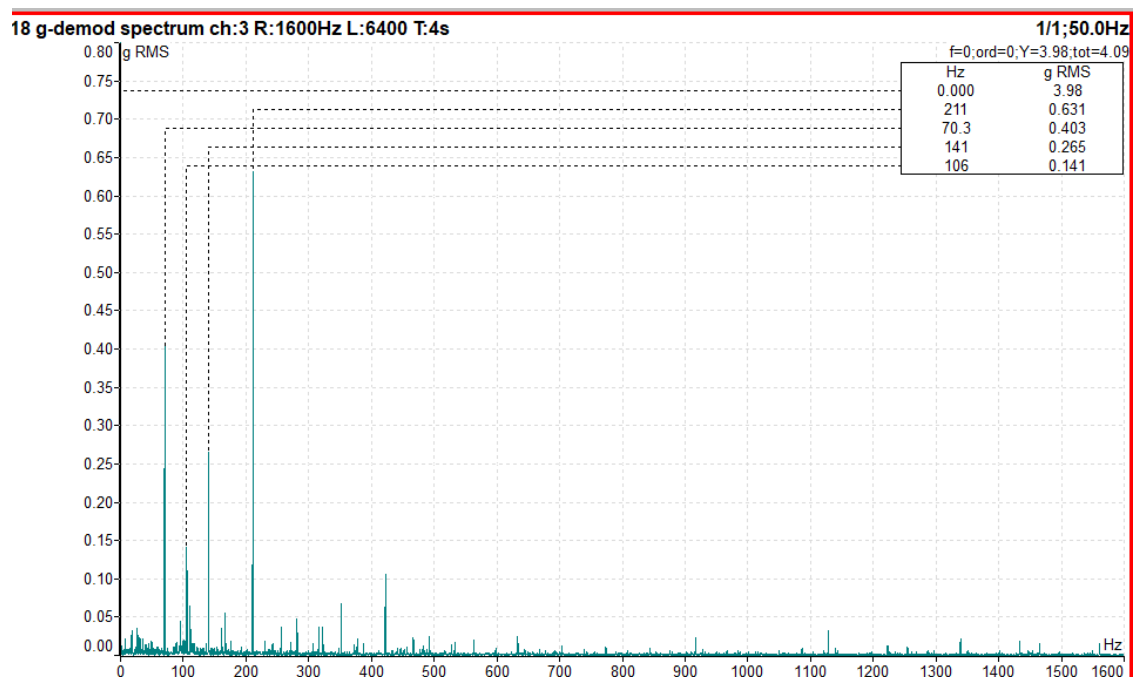
Obr. 47 Frekvenčné spektrum efektívnej rýchlosti vibrácií L2 (axiálna sonda)



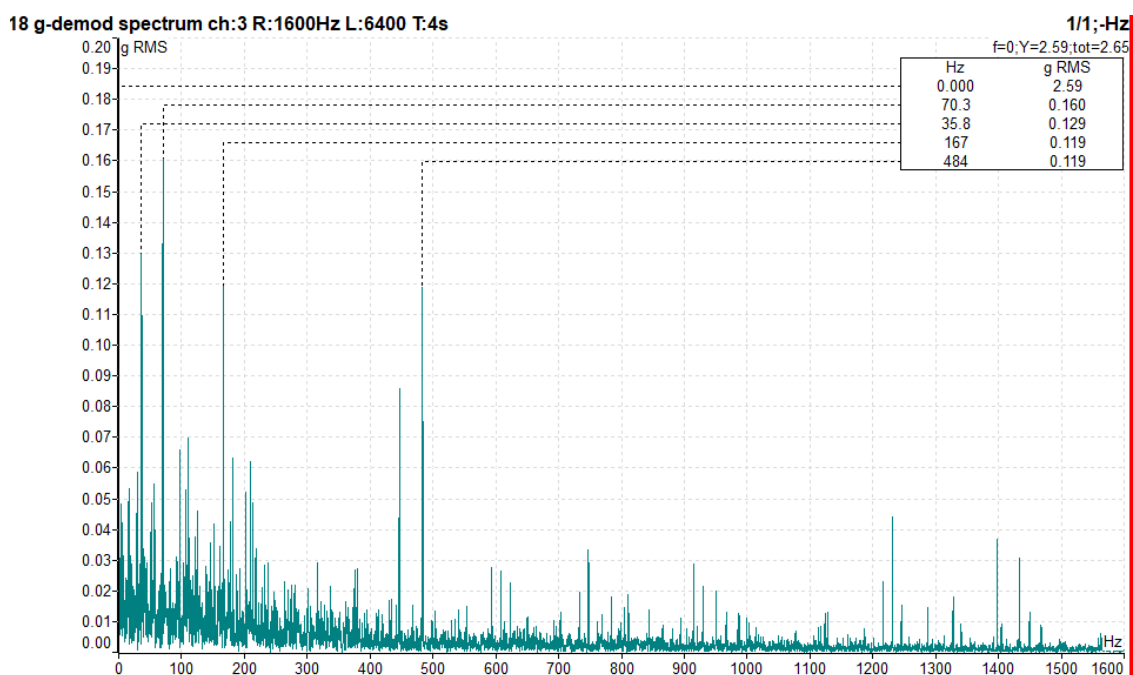
Obr. 48 Frekvenčné spektrum efektívneho zýchlenia vibrácií L1 (axiálna sonda)



Obr. 49 Frekvenčné spektrum efektívneho zýchlenia vibrácií L2 (axiálna sonda)



Obr. 50 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L1 motora (axiálna sonda)



Obr. 51 Obálka zrýchlenia vibrácií ložiska L2 motora (axiálna sonda)

8 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo vyhodnotenie technického stavu odstredivých čerpadiel a ich motorov vo firme PRECHEZA a.s.. Diagnostikované zariadenia slúžia na dodávanie vody do parnej turbíny. Realizácia meraní sa uskutočnila prostredníctvom analyzátora ADASH VA4 Pro. Tribodiagnostické rozbery odobraných vzoriek olejov sa vykonávali v laboratóriu VŠB-TUO.

Meranie vibrácií na zariadení A ukázalo zvýšené hodnoty efektívnych zrýchlení na oboch ložiskách motora odpovedajúce bežnému opotrebeniu. Chod stroja nie je ohrozený, ale pri prípadnej odstávke navrhujem výmenu poškodených ložísk.

V zariadení B je čerpadlo vo vyhovujúcom stave. Vibrácie od motorových ložísk prekračujú, predovšetkým L2, povolenú medzu. Aby sa objasnila vada spôsobujúca zvýšené hodnoty sa obálka zrýchlenia preložila poruchovými frekvenciami daného ložiska a to ukázalo, že najviac poškodený je vonkajší krúžok. Po meraní, miestna údržba ložiska premazala a meranie sme opakovali. Veľkosť vibrácií sa zvýšila, čiže do ložiskového priestoru priviedli príliš vysoké množstvo maziva. Počas druhého merania, ktoré sa uskutočnilo po mesačnej prestávke sa veľkosť vibrácií znížila, ale stále prekračovali dovolenú medzu a kvôli tomu navrhujem zahrnúť výmenu oboch ložísk motora do plánovania údržby.

Aj v poslednom zariadení C je čerpadlo vo vyhovujúcom stave. Stav motora je hodnotený ako zhoršený, ale výmena ložísk nie je potrebná.

Boli vykonané aj rozbery olejov odobratých od všetkých ložísk čerpadiel. Určovanie viskozity a obsahu vody nepreukázalo degradáciu oleja u žiadnej zo vzoriek. Prvková analýza však ukázala vysoké množstvo nežiadúcich látok v oleji a v niektorých prípadoch aj výrazný pokles aditív. Testy na určenie mechanických nečistôt ukázali katastrofálne znečistenie všetkých olejových náplní. Vzhľadom na tak vysoké znečistenie a nízky objem olejových náplní navrhujem úplnú výmenu oleja vo všetkých čerpadlách. Rozbor sa vykonal aj na referenčnej vzorke odobraného z kanistru. Ten ukázal znečistenie aj v uskladnenom oleji a preto doporučujem jeho prefiltrovanie alebo zakúpenie nového a prehodnotenie spôsobu skladovania používaných olejov.

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Janovi Blatovi PhD. za podnetné konzultácie, vecné rady a profesionálne vedenie pri spracovávaní mojej bakalárskej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať pánovi Mariánovi Heltkovi za spoluprácu a komunikáciu pri praktickej časti bakalárskej práce vo firme PRECHEZA a. s..

9 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. II, Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0650- 9.
- [2] ISO 10 816-7 Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998.
- [3] BERRY, James. Illustrated Vibration Diagnostic Wall Chart. Charlotte: Technical Associates of Charlotte, P.C., 2005.
- [4] ABB motors for water and wastewater [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/abb_water_motor_brochure.pdf?sfvrsn=5d38e21e_2
- [5] STAGE PUMPS CT [online]. 783 49 Lutín: SIGMA GROUP, 2014 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.sigmapompy.com.pl/wp-content/uploads/2015/10/CTPA.pdf>
- [6] SKF 6212-2Z/C3 Kuličkové ložisko [online]. Mateza [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/lozisko-skf-6212-2z-c3>
- [7] SKF NU 2211 ECJ Válečkové ložisko [online]. Mateza [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/lozisko-skf-nu-2211-ecj>
- [8] UŽIVATELSKÝ MANUÁL: A4400 VA4 Pro [online]. ADASH, 2019 [cit. 2019-04-20].
- [9] JANALÍK, Jaroslav. HYDRODYNAMIKA A HYDRODYNAMICKÉ STROJE. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008.
- [10] Druhy a rozdělení čerpadel [online]. 2010 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://druhy-čerpadel.cz/>
- [11] BRADA, Karel a Jaroslav BLÁHA. Hydrodynamická čerpadla. 2. prepracované. Tiskárna Krnov, spol. s.r.o.: České vysoké učení technické v Praze, 1992. ISBN 80-01-00802-9.
- [12] Ostatní druhy čerpadel [online]. Olomouc: ELUC [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>

[13] Principy průmyslových čerpadel: odstředivá čerpadla [online]. 2011 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovyh-cerpadel-4dil-od-strediva-cerpadla>